



**Luís Vasco Nazaré  
Pinho**

**Delaminagem na furação de plásticos reforçados  
por fibra de carbono**







**Luís Vasco Nazaré  
Pinho**

**Delaminagem na furação de plásticos reforçados por  
fibra de carbono**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica de João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Associado c/ Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



Dedico este trabalho aos meus pais Luís e Helena.



## **O júri / The jury**

Presidente / President

**Professor Doutor Vitor António Ferreira da Costa**

Professor Associado c/ Agregação do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Vogais / Committee

**Professor Doutor Luís Miguel Pereira Durão**

Professor Adjunto do Instituto Superior de Engenharia do Porto

**Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva**

Professor Associado c/ Agregação do departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro



## **Agradecimentos / Acknowledgements**

Gostaria de expressar a minha gratidão a todos aqueles que tornaram possível a realização deste trabalho.

Ao Prof. Doutor João Paulo Davim pela orientação e sabedoria partilhadas durante a elaboração desta dissertação.

Ao Engenheiro António Festas pela colaboração técnica e paciência dispensadas durante os ensaios experimentais.

Ao Prof. Doutor Nelson Martins pela disponibilização de equipamentos essenciais à realização deste trabalho, como a camara termográfica.

Ao Prof. Doutor Juan Campos Rubio pela disponibilização de material compósito essencial à realização deste trabalho.

Aos meus pais Luís e Helena, por acreditarem em mim incondicionalmente, mesmo nos momentos em que eu mais lhes dificulto essa tarefa e por todos os valores, e ensinamentos. Pois são as minhas maiores riquezas.

À minha irmã Loraine, por todos os conselhos dados, pela tua presença constante e ainda por me abençoares com os três novos amores da minha vida, o Francisco, o João e a Sofia. Esta também é para vocês putos!

Aos meus avós pelo carinho e compreensão que só os avós podem dar.

Aos meus “companheiros de batalha”, Gonçalo, João, Nuno, Richard e Trovisco que me ajudaram a atingir este marco. Valeu Engenheiros!

A todos os amigos que me acompanharam durante a minha formação, com os quais partilhei momentos que me tornaram no que sou hoje. “Isto não vem nos livros!”

Deixo para o fim o mais importante dos agradecimentos, à Ana. Por me fazeres acreditar que contigo a meu lado tudo é possível. És a força que une todas as moléculas do meu ser. A pessoa de todos os momentos. Conseguimos meu amor!





## palavras-chave

Brocas helicoidais, compósitos, delaminagem, fator de delaminagem, furação de CFRP's, imagem digital, plásticos reforçados por fibras de carbono, temperatura.

## resumo

Na atualidade, a aplicação de CFRP's ("*Carbon Fiber Reinforced Plastics*"), nas indústrias Aeronáutica e Aeroespacial, é uma das mais importantes. Este material tem ainda aplicações em indústrias de exploração petrolífera e de gás natural, bem como na maioria dos desportos motorizados de alta competição. A obtenção de furos neste material, recorrendo ao uso de brocas helicoidais é o método mais utilizado. Mas este método cria o fenómeno denominado de delaminagem que é responsável por grande parte das peças rejeitadas nas várias indústrias.

O presente trabalho pretende estudar e caracterizar o fenómeno da delaminagem de entrada e de saída, que ocorre na furação de placas de CFRP's.

É efetuado um estudo experimental que tenta relacionar a velocidade avanço e a velocidade de rotação com o fator de delaminagem de entrada e de saída. São testadas três técnicas de furação: a técnica de pré-furo, a técnica de "sandwich" e a técnica das placas de sacrifício. São avaliados os seus efeitos sobre o fator de delaminagem de entrada e de saída. Para o efeito são utilizadas duas ferramentas específicas para a furação de CFRP's.

São elaborados ensaios experimentais, na tentativa de relacionar a temperatura atingida no início da furação com o fator de delaminagem de entrada.

Concluiu-se que, o parâmetro processual com maior influência na delaminagem de entrada é a velocidade de avanço.

Das três técnicas testadas a que apresenta melhores resultados para a delaminagem de entrada é a técnica das placas de sacrifício e para a delaminagem de saída é a técnica de pré-furo.

Os resultados obtidos sugerem que, para as gamas de velocidades testadas, a delaminagem de entrada diminui com o aumento da temperatura de início de furação.



**keywords**

Carbon fiber reinforced plastic (CFRP), composites, delamination, delamination factor, digital image, drilling of CFRP's, helical drill, temperature.

**abstract**

Nowadays The application of Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP 's), in the Aeronautics and Aerospace industries, is one of the most important. This material also has applications for oil exploration and natural gas industries as well as in most motorsports industries.

Obtaining holes in this material, resorting to the use of a twist drill, is the most widely used method. But this method creates a phenomenon called delamination, which is responsible for much of the rejected parts in the various industries.

The present work aims to study and characterize the phenomenon of peal-up and push-out delamination, which occurs in drilling of CFRP 's plates.

An experimental study that attempts to link the feed rate and the spindle speed with the peal-up and push-out delamination was performed. For this purpose three different tools were used. One conventional tool and two specific tools for drilling CFRP 's plates.

Three drilling techniques were tested: the pre-drilled hole technique, the "sandwich" technique and the waste plates technique. The effects of these techniques are assessed on the peal-up and push-out delamination.

Experimental tests are developed in an attempt to relate, the temperature reached at the beginning of drilling, with the peal-up delamination.

It's concluded that the parameter with the greatest influence on the peal-up delamination is the feed rate.

Of the three tested techniques, the one that provides the best results for the peal-up delamination is the sacrificial plates technique and for the push-out delamination is the pre-drilled hole technique.

The results suggest that, for the range of parameters tested, the peal-up delamination decreases as the temperature reached at the beginning of the drilling process increases.



# Índice

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1      | Enquadramento . . . . .   | 1         |
| 1.2      | Objetivos . . . . .   | 2         |
| 1.3      | Conteúdo . . . . .  | 3         |
| <b>2</b> | <b>Estado d'arte da furação de CFRP's</b>                       | <b>5</b>  |
| 2.1      | Parâmetros processuais . . . . .                                | 5         |
| 2.2      | Ferramentas de corte . . . . .                                  | 8         |
| 2.3      | Forças de corte . . . . .                                       | 15        |
| 2.4      | Delaminagem . . . . .   | 18        |
| <b>3</b> | <b>Delaminagem na furação de compósitos laminados de CFRP's</b> | <b>27</b> |
| <b>4</b> | <b>Trabalho experimental</b>                                    | <b>31</b> |
| 4.1      | Placas de CFRP's . . . . .                                      | 32        |
| 4.2      | Brocas Helicoidais . . . . .                                    | 33        |
| 4.3      | Centro de maquinagem . . . . .                                  | 37        |
| 4.4      | Sistema de apoio das placas . . . . .                           | 38        |
| 4.5      | Ensaios . . . . .   | 38        |
| 4.5.1    | Estudo dos parâmetros processuais . . . . .                     | 38        |
| 4.5.2    | Estudo de diferentes técnicas de furação . . . . .              | 40        |
| 4.5.3    | Estudo da temperatura de início de furação . . . . .            | 41        |
| 4.6      | Aquisição de dados de imagem e temperatura . . . . .            | 42        |
| 4.6.1    | Reconhecimento de imagem . . . . .                              | 42        |
| 4.6.2    | Sistema de aquisição de dados de temperatura . . . . .          | 43        |

|          |                                   |           |
|----------|-----------------------------------|-----------|
| <b>5</b> | <b>Resultados e sua discussão</b> | <b>47</b> |
| 5.1      | Parâmetros processuais . . . . .  | 47        |
| 5.1.1    | Velocidade de avanço . . . . .    | 47        |
| 5.1.2    | Velocidade de rotação . . . . .   | 56        |
| 5.2      | Técnicas de furação . . . . .     | 61        |
| 5.3      | Estudo de temperatura . . . . .   | 64        |
| <b>6</b> | <b>Conclusões</b>                 | <b>69</b> |
| <b>7</b> | <b>Anexos</b>                     | <b>81</b> |
| 7.1      | Anexo 1 . . . . .                 | 81        |
| 7.2      | Anexo 2 . . . . .                 | 85        |
| 7.3      | Anexo 3 . . . . .                 | 89        |
| 7.4      | Anexo 4 . . . . .                 | 90        |
| 7.5      | Anexo 5 . . . . .                 | 91        |
| 7.6      | Anexo 6 . . . . .                 | 97        |
| 7.7      | Anexo 7 . . . . .                 | 99        |

# Lista de Figuras

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | Materiais constituintes da ferramentas específicas para FRP's. [Abrão et al., 2007] . . .  | 10 |
| 2.2 | Brocas utilizadas: a) broca “tapped”, b) broca helicoidal “8-facet”, broca helicoidal “2-facet”. [Lazar and Xirouchakis, 2011] . . . . .   | 14 |
| 2.3 | Brocas testadas: a) broca “SPUR”, b) broca “four-flute”, broca helicoidal. [Grilo et al., 2012] . . . . .  | 15 |
| 2.4 | Comparação entre a geometrias de corte da broca helicoidal e da broca especial “OP” [Reis, 2005] . . . . .   | 19 |
| 2.5 | Processamento digital das imagens da delaminação: a) Imagem digital inicial; b) Processamento; c) Imagem final binarizada. [Davim et al., 2007] . . . . .  | 21 |
| 2.6 | Comparação entre $F_d$ e $F_c$ e a sua variação com os parâmetros processuais. [Davim et al., 2007] . . . . .  | 21 |
| 2.7 | Gráficos de superfície e respectivas curvas de contorno. [Gaitonde et al., 2008] . . . . .   | 22 |
| 2.8 | Gráficos de superfície. [Karnik et al., 2008] . . . . .  | 23 |
| 2.9 | Processamento de imagem no “software” “Sherlock ®”: a) Imagem digital; b) Imagem processada. [Grilo et al., 2012] . . . . .  | 24 |
| 3.1 | Mecanismos de delaminação: a) Delaminação de entrada ou “peel-up”; b) Delaminação de saída ou “push-out” [Durão et al., 2010]. . . . .   | 27 |
| 3.2 | Imagem de entrada de um dos furo obtidos durante o trabalho experimental (ampliação 40x). . . . .  | 28 |
| 3.3 | Representação dos parâmetros geométricos considerados pelos vários fatores de delaminação: a) Esquema da grandezas que compõem o $F_{ed}$ [Tsao et al., 2011] b) Esquema da grandezas que compõem o $F_{ed}$ [Tsao et al., 2011] . . . . . | 30 |
| 4.1 | Placa de compósito laminado de CFRP's . . . . .  | 33 |
| 4.2 | Ferramenta A (“TiN”, 140°) . . . . .   | 34 |
| 4.3 | Ferramenta B (“Diamond”, 120°) . . . . .   | 35 |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 4.4  | Ferramenta C (convencional, 140°)  | 36 |
| 4.5  | Centro de maquinagem MIKRON VCE  | 37 |
| 4.6  | Suporte de furação   | 38 |
| 4.7  | Placa de CFRP's após alguns ensaios de furação   | 39 |
| 4.8  | Técnica das placas de sacrifício   | 40 |
| 4.9  | Técnica de "sandwich"  | 41 |
| 4.10 | As diversas fases da técnica de coloração  | 43 |
| 4.11 | As diversas fases do algoritmo de processamento de imagem  | 43 |
| 4.12 | "Setup" experimental de aquisição de dados de temperatura  | 43 |
| 4.13 | Interface gráfico do <i>software Thermal Replay ver. 1.0.1.9</i> :   |    |
|      | a) início do processo de furação; b) processo de furação dois "frames" após início;  |    |
|      | c) processo de furação quatro "frames" após início; d) processo de furação seis "frames" após início.  | 44 |
| 5.1  | Fator de delaminação de entrada em função da velocidade de avanço:   |    |
|      | a) Velocidade de rotação de 938rpm; b) Velocidade de rotação de 1875rpm;   | 48 |
| 5.2  | Fator de delaminação de entrada em função da velocidade de avanço:   |    |
|      | a) Velocidade de rotação de 3750rpm; b) Velocidade de rotação de 7500rpm.  | 49 |
| 5.3  | Fator de delaminação de saída em função da velocidade de avanço:   |    |
|      | a) Velocidade de rotação de 938rpm; b) Velocidade de rotação de 1875rpm;   | 51 |
| 5.4  | Fator de delaminação de saída em função da velocidade de avanço:   |    |
|      | a) Velocidade de rotação de 3750rpm; b) Velocidade de rotação de 7500rpm.  | 52 |
| 5.5  | Comparação entre a delaminação de entrada e a delaminação de saída de furos efetuados com uma $V_a$ de 0,2mm/rot e uma $V_{rot}$ de 7500rpm. |    |
|      | a) Entrada de um furo efetuado com a ferramenta A; b) Saída de um furo efetuado com a ferramenta A   |    |
|      | c) Entrada de um furo efectuado com a ferramenta B; d) Saída de um furo efetuado com a ferramenta B  | 53 |
| 5.6  | Comparação entre o fator de delaminação de entrada e o fator de delaminação de saída em função da velocidade de avanço:                      |    |
|      | a) Velocidade de rotação de 938rpm; b) Velocidade de rotação de 1875rpm;   | 54 |
| 5.7  | Comparação entre o o fator de delaminação de entrada e o fator de delaminação de saída em função da velocidade de avanço:                    |    |
|      | a) Velocidade de rotação de 3750rpm; b) Velocidade de rotação de 7500rpm.  | 55 |



## LISTA DE FIGURAS

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 5.8  | Fator de delaminação de entrada em função da velocidade de rotação:<br>a) Velocidade de avanço de 0,05mm/rot; b) Velocidade de avanço de 0,1mm/rot. . . . .                   | 56  |
| 5.9  | Fator de delaminação de entrada em função da velocidade de rotação:<br>a) Velocidade de avanço de 0,2mm/rot; b) Velocidade de avanço de 0,4mm/rot . . . . .                   | 57  |
| 5.10 | Fator de delaminação de saída em função da velocidade de rotação:<br>a) Velocidade de avanço de 0,05mm/rot; b) Velocidade de avanço de 0,1mm/rot; . . . . .                   | 58  |
| 5.11 | Fator de delaminação de saída em função da velocidade de rotação:<br>a) Velocidade de avanço de 0,2mm/rot; b) Velocidade de avanço de 0,4mm/rot. . . . .                      | 59  |
| 5.12 | Fator de delaminação de entrada em função da velocidade de avanço para as várias técnicas testadas: a) Ferramenta A (“TiN”, 140°); b) Ferramenta B (“Diamond”, 120°). . . . . | 61  |
| 5.13 | Fator de delaminação de saída em função da velocidade de avanço para as várias técnicas testadas: a) Ferramenta A (“TiN”, 140°); b) Ferramenta B (“Diamond”, 120°). . . . .   | 63  |
| 5.14 | Resultados da temperatura na entrada da ferramenta em função da velocidade de avanço a uma velocidade de rotação de 3750rpm. . . . .  | 65  |
| 5.15 | Resultados do fator de delaminação de entrada em função da temperatura de entrada da ferramenta a uma velocidade de rotação de 3750rpm. . . . .                               | 66  |
| 5.16 | Comparação entre ciclos de furação contínuos e ciclos de furação com patamares de arrefecimento: a) Ferramenta A (“TiN”, 140°); b) Ferramenta B (“Diamond”, 120°). . . . .    | 67  |
| 7.1  | Diferentes tipos de hastes [Steve and Albert, 1997] . . . . .   | 85  |
| 7.2  | Características geométricas de uma broca helicoidal tradicional. [Steve and Albert, 1997] . . . . .   | 86  |
| 7.3  | a) Esquematização da ponta de uma broca helicoidal; b) Perfil da ponta de uma broca helicoidal [Steve and Albert, 1997]. . . . .  | 87  |
| 7.4  | Características geométricas das brocas helicoidais [Reis, 2005]. . . . .  | 87  |
| 7.5  | Imagens obtidas por microscopia ótica dos furos realizados com a ferramenta A (“TiN”, 140°) a uma velocidade de rotação de 938rpm (Ampliação de 60x). . . . .                 | 89  |
| 7.6  | Imagens obtidas por microscopia ótica dos furos realizados com a ferramenta B (“Diamond”, 120°) a uma velocidade de 938rpm’s (Ampliação de 60x). . . . .                      | 89  |
| 7.7  | Imagem de um furo com defeitos localizados próximo da zona de furação que provocam um aumento súbito da delaminação. . . . .  | 90  |
| 7.8  | Resultados numéricos para entrada, ferramenta A (“TiN”, 140°). . . . .  | 99  |
| 7.9  | Resultados numéricos para saída, ferramenta A (“TiN”, 140°). . . . .  | 100 |
| 7.10 | Resultados numéricos para entrada, ferramenta B (“Diamond”, 120°). . . . .  | 101 |
| 7.11 | Resultados numéricos para saída, ferramenta B (“Diamond”, 120°). . . . .  | 102 |
| 7.12 | Resultados numéricos para entrada, ferramenta C (convencional, 140°). . . . .   | 103 |

|      |   |     |
|------|---|-----|
| 7.13 | Resultados numéricos para saída, ferramenta C (convencional, $140^{\circ}$ ). . . . .   | 104 |
| 7.14 | Resultados numéricos para entrada, técnica de pré-furo. . . . .   | 105 |
| 7.15 | Resultados numéricos para saída, técnica de pré-furo. . . . .   | 106 |
| 7.16 | Resultados numéricos para entrada, técnica de placas de sacrifício. . . . .   | 107 |
| 7.17 | Resultados numéricos para saída, técnica de placas de sacrifício. . . . .   | 108 |
| 7.18 | Resultados numéricos para entrada, técnica de “sandwich”. . . . .   | 109 |
| 7.19 | Resultados numéricos para saída, técnica de “sandwich”. . . . .   | 110 |
| 7.20 | Resultados numéricos para entrada, estudo de temperatura sem patamares de arrefeci-<br>mento entre furos. . . . .   | 111 |
| 7.21 | Resultados numéricos para entrada, estudo de temperatura com patamares de arrefeci-<br>mento entre furos. . . . .   | 112 |
| 7.22 | Temperaturas e “frames” considerados para a ferramenta A (“TiN”, $140^{\circ}$ ). . . . .   | 113 |
| 7.23 | Temperaturas e “frames” considerados para a ferramenta B (“Diamond”, $120^{\circ}$ ). . . . .   | 113 |
| 7.24 | Resultados numéricos para o estudo de temperatura Vs delaminação, para a ferramenta<br>A (“TiN”, $140^{\circ}$ ) e B (“Diamond”, $120^{\circ}$ ). . . . . | 114 |

# Lista de Tabelas

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Resumo das gamas de valores testadas pelos investigadores . . . . .                             | 8  |
| 4.1  | Características principais da ferramenta A. [ <i>Sandvik Portugal a</i> ] . . . . .             | 34 |
| 4.2  | Características principais da ferramenta B. [ <i>Sandvik Portugal b</i> ] . . . . .             | 35 |
| 4.3  | Características principais da ferramenta C. [ <i>Sandvik Portugal c</i> ] . . . . .             | 36 |
| 4.4  | Combinações dos parâmetros processuais . . . . .  | 39 |
| 4.5  | Valores dos parâmetros processuais usados nas três técnicas de furação . .                      | 40 |
| 4.6  | Valores dos parâmetros processuais para os ensaios de medição de temperatura                    | 41 |
| 7.1  | Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono. [ <i>Moura et al., 2011</i> ] . .             | 82 |
| 7.2  | Propriedades típicas de alguns termoplásticos. [ <i>Moura et al., 2011</i> ] . . . .            | 83 |
| 7.3  | Propriedades de resinas termoendurecíveis. [ <i>Moura et al., 2011</i> ] . . . . .              | 84 |
| 7.4  | Ficha do fabricante ferramenta A (“ <i>TiN</i> ”, 140 <sup>o</sup> ). . . . .                   | 91 |
| 7.5  | Ficha do fabricante ferramenta A (“ <i>TiN</i> ”, 140 <sup>o</sup> ) (continuação). . . . .     | 92 |
| 7.6  | Ficha do fabricante ferramenta B (“ <i>Diamond</i> ”, 120 <sup>o</sup> ). . . . .               | 93 |
| 7.7  | Ficha do fabricante ferramenta B (“ <i>Diamond</i> ”, 120 <sup>o</sup> ) (continuação). . . . . | 94 |
| 7.8  | Ficha do fabricante ferramenta C (convencional, 140 <sup>o</sup> ). . . . .                     | 95 |
| 7.9  | Ficha do fabricante ferramenta C (convencional, 140 <sup>o</sup> ) (continuação). . . .         | 96 |
| 7.10 | Características do centro de maquinagem . . . . .   | 97 |



# Nomenclatura

## Acrónimos

ANN Artificial Neural Network

CFRP's Carbon Fiber Reinforced Plastics

DLC Diamond Like Carbon

FRP's Fiber Reinforced Plastic's

HSS High Speed Steel

PCD Polycrystalline Diamond

PL Comprimento de ponta de uma broca

PVD Physical Vapor Deposition

## Simbolos

$\alpha$  Ângulo de saída ou folga da broca

$\beta$  Ângulo de gume / hélice

$\gamma$  Ângulo de ataque da broca

$\omega$  Ângulo de gume transversal da broca

$\phi$  Diâmetro da broca

$\sigma$  Ângulo de ponta da broca

$\varepsilon$  Ângulo de canto da broca

$r_\varepsilon$  Raio de canto da broca

**Abreviaturas**

$A_0$  Área nominal do furo

$A_d$  Área delaminada

$A_{max}$  Área relativa ao diâmetro máximo de delaminação

$D_{AVG}$  Área nominal do furo

$D_{eq}$  Diâmetro equivalente

$D_{MAR}$  Área Delaminada

$D_{RAT}$  Diâmetro máximo de delaminação

$F_a$  Força de avanço

$F_{da}$  Fator de delaminação adaptado

$F_d$  Fator de delaminação

$F_{ed}$  Fator de delaminação equivalente

$K_f$  Ângulo de aresta de corte da broca

$V_a$  Velocidade de avanço

$V_c$  Velocidade de Corte

$V_{rot}$  Velocidade de rotação

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Enquadramento

Na atualidade, a aplicação de CFRP's ("*Carbon Fiber Reinforced Plastics*"), nas indústrias Aeronáutica e Aeroespacial, é uma das mais importantes. O peso específico reduzido e a sua alta resistência à tração, fazem com que este material seja ideal para reduzir o consumo de combustível das aeronaves, mantendo ao mesmo tempo os requisitos de segurança e durabilidade. É por este motivo que a utilização de compósitos laminados na produção da fuselagem e na estrutura das aeronaves tem vindo a aumentar ao longo do tempo. A fuselagem de um "*Boeing 767*" tem na sua constituição 30% de compósitos laminados, no entanto, no "*Boeing 787*" e no "*AirBus A350*" essa percentagem atinge os 50% [Isbilar, O. and Ghassemieh E., 2013].

Este material, tem também um papel preponderante na grande maioria dos desportos de alta competição motorizados, onde é utilizado tanto nos chassis como em componentes estruturais e mecânicos dos veículos em questão. Para além destas áreas, estão ainda fortemente presentes em indústrias de exploração petrolífera e de gás natural e nos campos da biomecânica e de desenvolvimento de artigos desportivos de alta competição [Gaitonde et al., 2008].

As peças ou elementos estruturais de CFRP's são geralmente fabricados recorrendo a pré-impregnados de carbono, que são constituídos por uma mistura de fibras de carbono e resina para posterior consolidação, geralmente através da moldação em autoclave ou moldação manual. Apesar da geometria final obtida através deste processo ser bastante refinada, existe ainda, a necessidade de proceder a operações de maquinaria posteriores, como a fresagem das extremidades dos laminados e/ou a obtenção de furos para a colocação

de parafusos ou rebites para efeitos de montagem. Estas operações de acabamento podem provocar danos, como a delaminação, que afetam a integridade estrutural, a resistência à fadiga e a fiabilidade, a longo prazo, dos componentes de CFRP's. Existem dados que indicam que os danos relacionados com a delaminação são os causadores de cerca de 60% da rejeição de componentes na indústria aeronáutica. Como tal, a delaminação representa um custo bastante significativo para esta indústria, pois o processo de furação é, muitas vezes, dos últimos na cadeia de produção de componentes constituídos por CFRP's [Isbilir and Ghassemieh, 2013].

O custo associado às ferramentas utilizadas no processo de furação de componentes de CFRP's é também algo a ter em consideração. As ferramentas convencionais tendem a apresentar um desgaste muito elevado e um tempo de vida útil bastante reduzido, devido à natureza abrasiva das fibras de carbono. Para além disso, o calor gerado pelo processo de furação não pode ser transferido de forma eficiente, devido ao baixo coeficiente de condução térmica dos CFRP's. Ambos os factos contribuem para um acelerado desgaste na ferramenta, o que implica um custo acrescido no fabrico da peça [Zhang et al., 2013].

Pelos motivos acima descritos, considera-se pertinente a investigação levada a cabo ao longo desta dissertação, pois através de uma melhor compreensão do processo de furação de compósitos de CFRP's, será possível reduzir a ocorrência dos danos provocados, possibilitando assim, uma redução de custos no fabrico de componentes, bem como, um aumento na sua cadência de produção.

## 1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é o estudo da delaminação, na furação de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras de carbono (CFRP's), tendo como propósito a diminuição ou eliminação deste fenómeno.

Para este efeito, foi avaliada a influência dos parâmetros processuais, nomeadamente a velocidade de rotação ( $V_{rot}$ ) e a velocidade de avanço ( $V_a$ ), de forma a comprovar a hipótese, de que a escolha de parâmetros processuais adequados pode diminuir a ocorrência de delaminação.

Foram estudadas três técnicas de furação: a técnica do “pré-furo”, a técnica das placas de sacrifício e a técnica de “sandwich”. Na primeira, foi efetuado à priori um furo de menor diâmetro, na segunda foram colocadas duas placas de alumínio à entrada e saída do furo



e na terceira foi colocada uma placa de alumínio entre duas placas de CFRP's. Estas técnicas têm objetivos diferentes. A primeira pretende verificar se a pré-furação permite diminuir a delaminação de entrada e/ou de saída. A segunda técnica pretende verificar se o apoio providenciado pelas placas de sacrifício alteram a delaminação de entrada e/ou de saída. A terceira técnica serve para verificar, se a presença de um corpo estranho (placa de alumínio) provoca alterações na delaminação ocorrida durante o processo de furação.

Foi também efetuada uma monitorização da temperatura atingida na superfície de entrada do compósito, durante o início do processo de furação, na tentativa de relacionar esta temperatura com a delaminação verificada na peça. Este procedimento tem como objetivo, comprovar a hipótese de que a temperatura de início da furação pode alterar a ductilidade da matriz do compósito, alterando assim a delaminação de entrada ocorrida na peça.

Por fim, foi comparada a delaminação de entrada entre um processo de furação contínuo e um processo de furação com tempo de arrefecimento entre furos.

Para os ensaios de furação realizados ao longo do trabalho experimental foram utilizadas duas ferramentas específicas para a furação de CFRP's e uma ferramenta de furação convencional. As ferramentas específicas utilizadas foram: a broca R846-0500-30-A1A 1220 CoroDrill® Delta-C “solid carbide drill”, definida ao longo deste trabalho por Ferramenta A (“*TiN*”, 140°); a broca 856.1-0500-05-A0 N20C CoroDrill® Delta-C “solid carbide drill”, definida como Ferramenta B (“*Diamond*”, 120°) e a ferramenta convencional utilizada foi a broca R415.5-0500-30-AC0 1010, definida como Ferramenta C (convencional, 140°).

Nestes ensaios fez-se variar os parâmetros processuais, nomeadamente a velocidade de rotação da árvore da máquina ( $V_{rot}$ ) e a velocidade de avanço da ferramenta ( $V_a$ ), recorrendo a gamas de valores o mais abrangentes possível, considerando os limites tanto do centro de maquinaria utilizado, como os limites máximos das ferramentas.

Os ensaios de furação serviram também para testar a ferramenta B (“*Diamond*”, 120°) que é bastante recente, visto ter sido posta à venda em 2013 pela “Sandvik®” Portugal.

## 1.3 Conteúdo

Inicia-se esta dissertação com um estudo bibliográfico sobre o tema da furação de CFRP's, de modo a enquadrar o trabalho experimental e os resultados obtidos, com os trabalhos de outros investigadores.

De seguida é efetuada uma análise do fenómeno da delaminação, bem como dos fatores usados para a avaliar, de modo a permitir um enquadramento com as características geométricas que definem este fenómeno.

No capítulo seguinte é feita uma descrição pormenorizada do trabalho experimental realizado, definindo o material, as ferramentas utilizadas, os ensaios de furação e a captação e tratamento de dados. De seguida são apresentados os resultados obtidos após o tratamento de dados. Por fim são apresentadas as conclusões inferidas no final desta dissertação.

## Capítulo 2

# Estado d'arte da furação de CFRP's

Desde a década de 70, uma vasta quantidade de estudos foram desenvolvidos na área de furação de plásticos reforçados por fibras (FRP's). Ao longo deste capítulo, é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema.

O estudo mais antigo encontrado, na área de furação de FRP's, teve como autores *Everstine and Rogers, [1971]*. Só mais de uma década depois, em 1985 surge o primeiro estudo de furação de laminados de CFRP's, efetuado por *Koenig et al., [1985]*.

*Miller, [1987]* apresentou uma base de dados com os valores dos parâmetros processuais, otimizados para a furação de FRP's com vista a minimizar os danos na peça [*Davim and Reis, 2003b*].

Tendo em conta que a grande maioria dos autores afirma que os principais elementos que influenciam a qualidade dos furos são os parâmetros processuais ( $V_c$  e  $V_a$ ), a ferramenta de corte (material e geometria) e as forças de corte, torna-se mais eficiente enunciar estes estudos de forma cronológica, inserindo cada referência em sub capítulos que descrevem brevemente os elementos supracitados. Para além dos estudos que abordam o tema da delaminação, são também referidos estudos que abordam temas como, o defeito geométrico (circularidade) e a rugosidade excessiva da parede do furo.

### 2.1 Parâmetros processuais

A grande maioria dos autores considera que a escolha correta dos parâmetros processuais ( $V_c$  e  $V_a$ ) é preponderante para a qualidade final dos furos efetuados. Sendo que, uma seleção incorreta dos mesmos, conduz invariavelmente a danos visíveis nos laminados de CFRP's. [*Piquet et al, 2000; Ramulu et al, 2001; Won and Dharan, 2002b; Davim and*

## CAPÍTULO 2. ESTADO D'ARTE DA FURAÇÃO DE CFRP'S

---

*Reis, 2003a; Davim et al, 2004a; El-Sonbaty et al, 2004; Khashaba, 2004; Tsao and Hocheng, 2004; Langela et al, 2005; Mohan et al, 2005; Singh et al, 2005a; Singh et al, 2005b; Tsao and Hocheng, 2005c; Karnik et al., 2008]*

Em 1993, *Hocheng and Puw, [1993]* concluíram que a utilização de velocidades de corte muito elevadas em conjunto com velocidades de avanço muito baixas conduziam a um dano térmico nos laminados de CFRP's provocado por um aumento da temperatura, produzindo assim furos de baixa qualidade no que refere à sua geometria. Contudo, *Lin and Chen [1996]* combinaram velocidades de corte elevadas ( $V_c$  [210 - 859] m/min) com avanços muito baixos ( $V_a$  [0,03 - 0,07] mm/rot) na furação de compósitos laminados de CFRP's com 60% de fibras. Os furos obtidos apresentam uma qualidade aceitável estando praticamente isentos de delaminagem [*Reis, 2005*].

*Lin and Chen, [1996]*, avaliaram o efeito de grandes velocidades de corte ( $V_c$ ) sobre a força de avanço ( $F_a$ ), o binário ( $M_a$ ), o desgaste na ferramenta e a qualidade final do furo. Estes autores utilizaram uma broca multifacetada e uma broca helicoidal e a gama de valores de velocidade de rotação ( $V_{rot}$ ) variou entre 9550 e 38650rpm. Os investigadores concluíram que a força de corte ( $F_c$ ) diminui, com o aumento da velocidade de rotação ( $V_{rot}$ ) e por conseguinte diminui também a delaminagem [*Gaitonde et al., 2008*].

Durante o ano de 2001, *Enemuoh et al., [2001]* recorreram à metodologia de “*Taguchi*”, de modo a determinar a influência dos parâmetros processuais na qualidade geral de furos efetuados em compósitos laminados de CFRP's, permitindo-lhes assim inferir os valores ideais para esses mesmos parâmetros [*Abrão et al., 2007*].

*Davim and Reis, [2003a]* concluíram que o aumento simultâneo, da velocidade de corte ( $V_c$ ) e da velocidade de avanço ( $V_a$ ), contribui para a deterioração da qualidade de furos efetuados em compósitos laminados de CFRP's. A gama de valores utilizados pelos investigadores foram de 16 a 32m/min para a velocidade de corte ( $V_c$ ) e de 0,04 a 0,15mm/rot para a velocidade de avanço ( $V_a$ ) [*Abrão et al., 2007*].

*Davim and Reis, [2003b]*, analisaram a influência dos parâmetros processuais ( $V_c$  e  $V_a$ ) sobre a delaminagem. As gamas de valores variaram entre 1000 e 2000rpm e entre 0,04 e 0,15mm/rot para a  $V_{rot}$  e para a  $V_a$  respetivamente. Os ensaios de furação foram efetuados recorrendo a brocas com três geometrias distintas. Os autores concluíram que o fator de

delaminação aumenta com o aumento de ambos os parâmetros analisados, mas que o parâmetro mais influente é a  $V_c$  tendo uma influência estatística no fator de delaminação na ordem dos 66%.

Em 2005, os investigadores *Tsao and Hocheng, [2005]* realizaram ensaios de furação em compósitos de CFRP's obtidos por autoclave. Mantendo uma  $V_c$  constante (31m/min), variaram apenas a  $V_a$  numa gama compreendida entre 0,008 e 0,018mm/rot. Tendo verificado que a diminuição da  $V_a$  contribuía para melhorar a qualidade geral do furo [*Abrão et al., 2007*].

*Gaitonde et al., [2008]* efetuaram uma análise sobre a influência da  $V_c$  e da  $V_a$  sobre fator de delaminação. Utilizaram uma gama de valores de  $V_c$  que varia entre 60 e 600m/min e uma gama de valores de  $V_a$  que varia entre 1 e 6m/min. Os ensaios de furação foram realizados com recurso a brocas de 5mm de diâmetro de carboneto sinterizado (K20) com três ângulos de ponta ( $\sigma$ ) diferentes, 85°, 115° e 130°. Os investigadores concluíram que uma combinação cuidada entre o ângulo de ponta ( $\sigma$ ) e uma velocidade de avanço ( $V_a$ ) é essencial para reduzir o dano na superfície de entrada do compósito.

*Karnik et al., [2008]* desenvolveram uma análise sobre a furação a alta velocidade de compósitos laminados de CFRP's, recorrendo a um modelo computacional designado por "artificial neural network model". Os parâmetros de entrada do modelo foram a ( $V_{rot}$ ) que variou entre 4000 e 40000rpm, a  $V_a$  que variou entre 1000 e 6000mm/min e o ângulo de ponta ( $\sigma$ ) da broca que assumiu os valores de 85, 115 e 85°. A influência dos três parâmetros sobre a delaminação foi verificada pelo modelo computacional. Uma combinação entre, valores elevados da  $V_c$  e valores reduzidos da  $V_a$  foi deduzida tendo como objetivo minimizar a delaminação. O modelo indicou ainda vantagens na utilização de  $V_{rot}$  na ordem dos 40000rpm, visando a redução do fator de delaminação à entrada do furo.

*Krishnaraj et al., [2012]* abordaram o tema da furação de compósitos laminados de CFRP's, tentando preencher uma lacuna nos estudos até então efetuados, realizando estudos sobre a furação deste material recorrendo a altas velocidades de maquinagem. As ferramentas utilizadas foram brocas helicoidais de carbonetos sinterizados de tungsténio (WC; K20) de 5mm de diâmetro. As gamas dos parâmetros processuais utilizados foram as seguintes, a  $V_{rot}$  entre as 12000 e as 20000rpm e a  $V_a$  entre os 0,01 e os 0,30mm/rot. Os autores afirmam que a  $V_a$  é o parâmetro mais influente na  $F_a$  gerada, na delamina-

gem à saída e no diâmetro real do furo. Afirmam ainda que a  $V_{rot}$  é um dos fatores determinantes para a circularidade real do furo e que esta se apresenta mais próxima da circularidade nominal para o valor de 20000rpm. Estes investigadores concluíram também que nenhum dos parâmetros processuais tem qualquer influência sobre a delaminação à entrada do furo. Indicam ainda os valores otimizados para a  $V_{rot}$  (12000rpm) e para a  $V_a$  (0,137mm/rot).

Na tabela 2.1, podemos ver um resumo das gamas de valores testadas pelos investigadores, presentes nesta revisão bibliográfica.

Tabela 2.1: Resumo das gamas de valores testadas pelos investigadores

| Investigadores                 | $V_a$<br>[mm/rot] | $V_a$<br>[m/min] | $V_{rot}$<br>[rpm] | $V_{corte}$<br>[m/min] |
|--------------------------------|-------------------|------------------|--------------------|------------------------|
| <i>Lin and Chen, 1996</i>      | -                 | -                | [9550 - 38650]     | -                      |
| <i>Davim and Reis, 2003a</i>   | [0,04 - 0,15]     | -                | -                  | [16 - 32]              |
| <i>Davim and Reis, 2003b</i>   | [0,04 - 0,15]     | -                | [1000 - 2000]      | -                      |
| <i>Tsao and Hocheng, 2005</i>  | [0,008 - 0,018]   | -                | -                  | 31                     |
| <i>Gaitonde et al., 2008</i>   | -                 | [1 - 6]          | -                  | [60 - 600]             |
| <i>Karnik et al., 2008</i>     | -                 | [1 - 6]          | [4000 - 40000]     | -                      |
| <i>Krishnaraj et al., 2012</i> | [0,01 - 0,3]      | -                | [12000 - 20000]    | -                      |

## 2.2 Ferramentas de corte

### Material da ferramenta

A furação de materiais compósitos reforçados com fibra de carbono requer a utilização de ferramentas com uma resistência ao desgaste maior do que o habitual. Este facto deve-se à natureza abrasiva do reforço, à anisotropia e à baixa condutividade térmica do compósito, o que eleva a temperatura atingida pela ferramenta durante a operação [*Reis, 2005*].

Vários investigadores, como *Chambers and Bishop, [1995]*; *Jahanmir et al, [1999]* e *Piquet et al., [2000]* efetuaram ensaios de furação com o objetivo de comparar ferramentas com inserto de PCD, com ferramentas revestidas por carboneto de tungsténio sinterizado (WC-Co) com 6% de cobalto (ISO513), chegando à conclusão que, o custo inferior associado às propriedades mecânicas apresentadas pelas ferramentas de carboneto sinterizado (WC-Co), faz das mesmas a melhor opção para produções unitárias ou de pequenas séries de peças. Apesar de terem um tempo de vida útil inferior às ferramentas com inserto de

PCD [Reis, 2005; Abrão et al., 2007].

De acordo com os estudos de *Sakuma et al.*, [1984] e de *Malhotra*, [1990], a utilização de aço rápido (HSS) para o fabrico de ferramentas de furação de compósitos de CFRP's não é adequada, devido ao rápido desgaste que estas apresentam quando comparadas com as ferramentas revestidas por carbonetos sinterizados. Esta conclusão é corroborada pelos estudos de *Hocheng and Puw*, [1992] e de *Mehta et al.* [1992], que concluíram que aço rápido (HSS) não é o material indicado para a furação deste tipo de material. [Reis, 2005]

*Chambers and Bishop*, [1995] compararam o desgaste em ferramentas de carbonetos sinterizado de tungsténio (WC), com o desgaste em ferramentas de PCD, aquando da furação de compósitos de CFRP's. A ferramenta de carbonetos de tungsténio apresentou um desgaste na aresta de corte de 0,25mm para 5 minutos de utilização, enquanto a ferramenta revestida por PCD apresentou um desgaste de 0,1mm para 10 minutos de utilização. Ficando assim clara a conclusão de que as ferramentas de PCD apresentam melhor desempenho ao nível do desgaste que as ferramentas de carbonetos de tungsténio quando utilizadas na furação de compósitos de CFRP's [Abrão et al., 2007].

*Lin and Chen*, [1996] utilizaram ferramentas compostas por carbonetos sinterizados (K10) para a furação de compósitos de CFRP's, recorrendo a uma elevada gama de velocidades de corte. Estes autores concluíram que estas condições conduzem a um desgaste acelerado da ferramenta, desgaste esse que provoca alterações na geometria de corte. O que leva a uma diminuição da qualidade geral dos furos efetuados [Abrão et al., 2007].

*Chen*, [1997] realizou ensaios de furação em compósitos laminados de CFRP's unidirecionais e multi direcionais, recorrendo a uma ferramenta de aço rápido (HSS) e a uma  $V_c$  na ordem dos 100m/min. O investigador concluiu, que estes parâmetros conduzem a um desgaste acelerado da ferramenta, tendo esta apresentado um desgaste na aresta de corte de 0,8mm ao fim de 26 furos [Reis, 2005].

No ano de 2000, *Piquet et al.*, [2000] compararam ferramentas de carbonetos de tungsténio com microgrão (K20), com ferramentas de PCD, para a furação de compósitos de CFRP's, chegando à conclusão que as ferramentas de carbonetos de tungsténio com microgrão (K20) são as mais indicadas, devido à relação de custo que apresentam face às ferramentas revestidas a PCD [Abrão et al., 2007].

*Ramulu et al.*, [2001] estudaram três tipos de ferramentas distintas, nomeadamente, brocas de aço rápido (HSS), brocas compostas por uma liga de aço rápido e cobalto (HSS-Co) e por fim brocas compostas por carbonetos sinterizados de tungstênio (WC) com uma classificação K10. Os investigadores concluíram que, a broca de carbonetos sinterizados (WC) teve um desempenho muito superior, apresentando um desgaste mínimo (0,1mm) na aresta de corte, enquanto as ferramentas compostas por aço rápido (HSS) e por uma liga de aço rápido e cobalto (HSS-Co) apresentaram um enorme desgaste na aresta de corte [Reis, 2005].

*Davim and Reis*, [2003a] compararam o desgaste resultante da furação de compósitos laminados de CFRP's (com 55% de fibras) em ferramentas de aço rápido (HSS) e em ferramentas de carbonetos sinterizados (K10). Verificando que a ferramenta de carbonetos sinterizados não apresentou qualquer desgaste ao fim de 18 furos, enquanto que a ferramenta de aço rápido (HSS) apresentou um desgaste de 0,012mm na aresta de corte [Abrão et al., 2007].

*Abrão et al.*, [2007] apresentaram nos seus estudos, as percentagens de utilização dos diferentes materiais, para as ferramentas específicas para furação de FRP's. Estas percentagens podem ser vistas na figura 2.1.

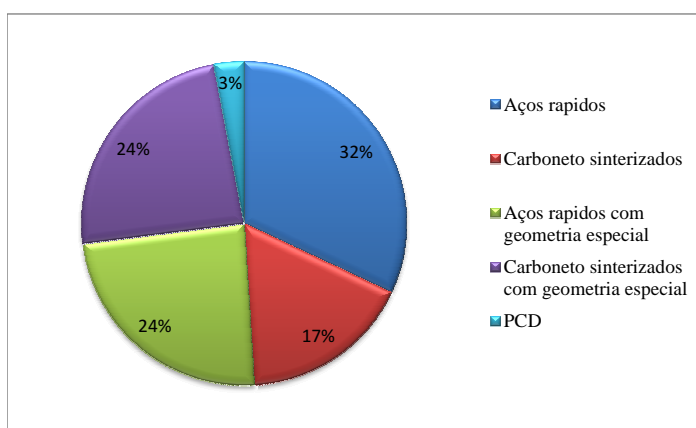


Figura 2.1: Materiais constituintes da ferramentas específicas para FRP's. [Abrão et al., 2007]

O material de excelência para este tipo de ferramentas é o diamante policristalino (PCD), sendo que já foi estudado por vários investigadores como *Hocheng and Puw*, [1992]; *Edwards*, [1993]; *Jahanmir et al.*, [1999]; *Velayudham et al.*, [2005]. No entanto, o custo



associado destas ferramentas é bastante elevado e a sua utilização apenas é justificada na furação de grandes series de peças. [Reis, 2005]

### Geometria da ferramenta

Os primeiros estudos sobre a furação de compósitos de CFRP's foram efetuados recorrendo a ferramentas de furação convencionais, cuja função era a furação de materiais metálicos. Koenig and Grass, [1989]; Hocheng and Dharan, [1990]; Jain and Yang, [1993] e Adams, [1996], desenvolveram estudos com recurso a ferramentas de furação convencionais para materiais metálicos. Estes estudos concluíram que o uso deste tipo de ferramentas para a furação de compósitos de CFRP's não é aconselhável, devido aos danos provocados nas peças. Os danos observados foram a delaminação, tanto à entrada como à saída do furo, defeito de circularidade e dano térmico visível na parede do furo [Reis, 2005].

Tendo em conta estas conclusões e com o propósito de diminuir os danos acima referidos, os fabricantes desenvolveram ferramentas específicas para a furação de compósitos de CFRP's com geometrias alternativas às convencionais. Estas ferramentas foram sendo testadas pelos investigadores, ao longo dos anos, com o intuito de entender se existiam realmente vantagens mensuráveis na sua utilização [Reis, 2005].

Mehta et al., [1992] testaram diferentes ferramentas na furação de compósitos de CFRP's, chegando à conclusão que as mais indicadas para esta função, seriam a broca "Dagger" e a broca de oito arestas de corte. Apesar disso, anos mais tarde em 1997, Persson et al. [1997] deduziram que a broca "Dagger" era mais eficiente na furação de compósitos laminados de CFRP's que a broca de oito arestas de corte [Reis, 2005].

Chambers and Bishop, [1995] realizaram ensaios de furação em placas de compósitos laminados de matriz epóxida reforçada com 60% de fibra de carbono e 5mm de espessura. Utilizaram três brocas de carbonetos sinterizados (K10), com geometrias diferentes: a broca de geometria helicoidal com um ângulo de ponta ( $\sigma$ ) de 118°, a broca "Dagger" com ângulo de ponta ( $\sigma$ ) de 30° e a broca multifacetada (SAAB), todas com 6mm de diâmetro. Os parâmetros processuais utilizados foram uma velocidade de corte ( $V_c$ ) de 50m/min e uma velocidade de avanço ( $V_a$ ) de 0,05mm/rot. Estes investigadores concluíram que a broca "Dagger" seria a mais indicada das três, para a furação deste tipo de material, tanto em relação ao desgaste apresentado nas ferramentas como na qualidade apresentada pelos furos [Abrão et al., 2007].

*Lin and Chen, [1996]* realizaram ensaios de furação, em placas de compósitos laminados de matriz epóxida reforçada com 60% de fibra de carbono. Utilizaram dois tipos de broca distintas de carbonetos sinterizados (K10): uma broca helicoidal e uma multifacetada (CUMET). A gama de velocidades de corte ( $V_c$ ) utilizadas variou entre os 210m/min e os 859m/min, o que provocou um elevado desgaste na geometria de corte das ferramentas, como era esperado pelos investigadores. Com estes parâmetros de corte a broca multifacetada não apresentou melhor desempenho que a broca helicoidal [*Abrão et al., 2007*].

*Piquet et al., [2000]* avaliaram a influência da geometria de corte das ferramentas, na qualidade dos furos obtidos em compósitos de CFRP's, comparando duas brocas de geometrias diferentes: uma broca helicoidal ( $\phi 4,8\text{mm}$ ;  $\beta$  de  $25^\circ$ ;  $\gamma$  de  $6^\circ$ ;  $\alpha$  de  $6^\circ$ ) e uma broca com três arestas de corte ( $\phi 4,8\text{mm}$ ;  $\beta$  e  $\gamma$  de  $0^\circ$ ;  $\alpha$  de  $6^\circ$ ). Para ambas as brocas, o valor de ângulo de ponta ( $\sigma$ ) máximo era  $59^\circ$  mas no caso da broca de geometria especial, este ângulo variou entre os 0 e os  $59^\circ$ . Os investigadores concluíram que a broca com três arestas de corte teve um desempenho superior à broca helicoidal e ainda que esta última apenas apresenta resultados satisfatórios quando é efetuado um furo à priori de diâmetro inferior (técnica de pré-furo) [*Abrão et al., 2007*].

Os investigadores *Davim and Reis [2003a]* e *Davim et al., [2004a]* investigaram o efeito da geometria de corte de várias ferramentas na furação de plásticos reforçados com fibras (FRP's). Analisaram o desempenho de três tipos de brocas, com geometrias de corte distintas, em operações de furação de compósitos constituídos tanto por CFRP's como GFRP's. Os tipos de brocas utilizadas foram: uma broca helicoidal, uma broca de quatro arestas de corte e uma broca de geometria específica a "*Brad & Spur*". Estes investigadores concluíram que a broca recomendada para a furação de ambos os tipos de compósitos seria a "*Brad & Spur*".

*Davim and Reis, [2003b]* analisaram a influência que diferentes geometrias de broca teriam sobre a delaminação. Utilizaram brocas com três geometrias distintas: uma broca helicoidal (K10), uma broca helicoidal HSS e uma broca com uma geometria de corte específica ("*four flute*" K10). A gama de condições de corte variou entre 1000 e 2000rpm e entre 0,04 e 0,15mm/rot para a  $V_{rot}$  e para a  $V_a$  respetivamente. Os autores chegaram à conclusão que a broca que apresenta melhor performance na furação de compósitos lami-

nados de CFRP's é a broca helicoidal (K10).

Durante os anos de 2003, 2004 e 2005 os investigadores *Tsao and Hocheng* [2003, 2004, 2005a), 2005b), 2005c)] realizaram estudos, envolvendo ensaios de furação em compósitos laminados de CFRP's com 5mm de espessura. Estes estudos têm como objetivo, avaliar a performance de cinco tipos de brocas distintas, nomeadamente, a broca helicoidal, a broca de seis arestas de corte "*Saw drill*", a broca escalonada "*Step drill*", a broca "*Core*" e a broca "*Candle Stick*". Após estes estudos os autores afirmam que a broca "*Candle Stick*" e a broca "*Saw drill*" apresentaram melhores resultados relativamente à qualidade de furos efetuados, que todas as restantes [Abrão et al., 2007].

*Hocheng and Tsao*, [2006] chegaram à conclusão, que nas ferramentas com geometrias de corte específicas para a furação de FRP's, o valor máximo de velocidade de avanço para o qual não ocorre delaminação é superior que o mesmo valor para as ferramentas convencionais [Abrão et al., 2007].

*Tsao*, [2008] apresentou um artigo em que usa brocas do tipo "*stepped*" para furar compósitos laminados de CFRP's de 4mm de espessura, com o objetivo de diminuir a força de avanço ( $F_a$ ) e consequentemente a delaminação [Shyha et al., 2010].

*Shyha et al.*, [2009] realizaram ensaios de furação em laminados compósitos de CFRP's de 3mm de espessura, com o objetivo de determinar a influência de parâmetros de controle sobre parâmetros de saída relevantes, como o dano sobre o compósito ou o desgaste na ferramenta. A identificação de valores otimizados para os parâmetros de controle do processo de furação foi também conseguida. Os autores recorreram ao método de "*Taguchi*", em que quatro dos seis parâmetros de entrada são: o tipo de broca (helicoidal ou "*stepped*"), a existência ou ausência de revestimento superficial em titânio (TiN) na broca, o ângulo de ponta da broca ( $\sigma=118^\circ$  ou  $\sigma = 140^\circ$ ) e o ângulo de hélice da broca ( $\beta = 24^\circ$  ou  $\beta = 30^\circ$ ). Os autores afirmam que o tipo de broca empregue (helicoidal ou "*stepped*") é um dos fatores preponderantes para o desgaste da ferramenta, visto que a utilização de brocas do tipo "*stepped*" não revestidas e com uma gama de  $V_a$  elevada, aumenta o tempo útil de vida da ferramenta. Afirmam ainda que o ângulo de hélice ( $\beta$ ) não tem qualquer correlação com os parâmetros de saída avaliados [Shyha et al., 2010].

*Shyha et al.*, [2010], analisaram os resultados experimentais de furação de três tipos

de compósitos laminados de CFRP's de 3mm de espessura, com brocas do tipo “stepped” de carboneto sinterizado com 1,5mm de diâmetro. Como na maioria das brocas utilizadas a uma  $V_a$  superior a 0,4mm/rot, ocorreram falhas catastróficas, os autores atribuíram esse fator à configuração geométrica das brocas (“stepped”), aconselhando um valor máximo para a  $V_a$  de 0,2mm/rot.

Lazar and Xirouchakis, [2011], investigaram a evolução das forças de corte na operação de furação em placas de compósitos laminados de FRP's, nomeadamente a força de avanço ( $F_a$ ) e o binário ( $M_a$ ). Para tal, utilizaram três ferramentas com geometrias distintas, a broca do tipo “tapered”: a broca helicoidal do tipo “8-facet” e a broca helicoidal do tipo “2-facet”, estas ferramentas e o esquema das suas arestas de corte podem ser vistas na figura 2.2. Esta investigação mostrou, que os parâmetros com mais influência na possível redução das forças de corte, nomeadamente a  $F_a$  e o  $M_a$  são: a geometria da ferramenta e a  $V_a$ , sendo que a zona de maior importância na ferramenta é a aresta de corte principal.

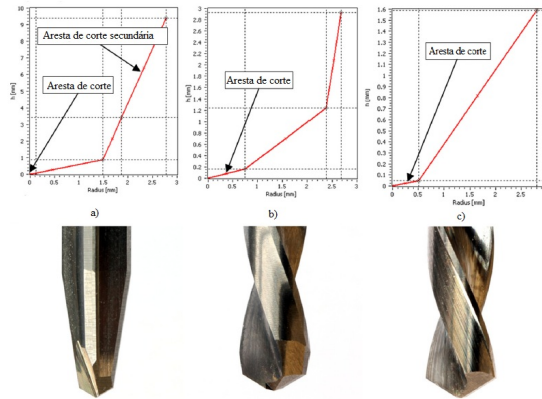


Figura 2.2: Brocas utilizadas: a) broca “tapered”, b) broca helicoidal “8-facet”, broca helicoidal “2-facet”. [Lazar and Xirouchakis, 2011]

Durante o ano de 2012 os investigadores Grilo et al., [2012] testaram três ferramentas de furação com geometrias diferentes: uma broca helicoidal com ângulo de ponta ( $\sigma$ ) de  $140^\circ$ , uma broca do tipo “four flute” e uma broca do tipo “SPUR”. Estas ferramentas podem ser vistas na figura 2.3. Os parâmetros de corte utilizados foram: a  $V_a$ , que varia entre os valores de 3000, 4000 e 5000mm/min e a  $V_{rot}$  que foi fixada nos 6750rpm. Os investigadores concluíram que a broca do tipo “SPUR” obteve os melhores resultados, tendo a mesma apresentado furação livre de delaminação, tanto à entrada como à saída

do furo, para uma  $V_{rot}$  de 6750rpm e uma  $V_a$  de 2025mm/min. Concluíram ainda que os furos efetuados com a broca do tipo “four-flute” apresentam partes por cortar no seu perímetro.

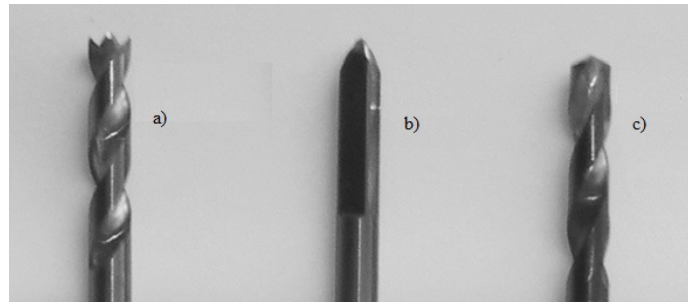


Figura 2.3: Brocas testadas: a) broca “SPUR”, b) broca “four-flute”, broca helicoidal. [Grilo et al., 2012]

## 2.3 Forças de corte

Desde o início dos estudos sobre o tema da furação de compósitos de matriz polimérica reforçado com fibras, investigadores como Koenig et al., [1985]; Tagliaferri et al., [1990]; Komanduri, [1993]; Mathew et al., [1999] concordam que, para que este processo ocorra de forma eficiente e com qualidade, são necessárias forças de corte baixas.

A  $F_a$  é diretamente proporcional à  $V_a$  e está diretamente ligada à geometria de corte da ferramenta. Logo, é possível a redução da  $F_a$  reduzindo a  $V_a$ , ou recorrendo a ferramentas com geometria específicas que devido ao seu ângulo de ponta ( $\sigma$ ) podem alterar a direção do vetor da força efetiva de corte, alterando assim a  $F_a$  [Reis, 2005].

Chamber and Bishop, [1995] constataram que, independentemente da geometria de corte utilizada, o aumento da  $V_a$  provoca invariavelmente um aumento das forças de corte ( $F_a$  e  $M_a$ ). Contudo, também verificaram que para os mesmos parâmetros processuais ( $V_c = 50\text{m/min}$  e  $V_a = 0.05\text{mm/rot}$ ) a ferramenta “Dagger” manifestou uma  $F_a$  cerca de 30% inferior à apresentada pela broca helicoidal e pela broca multifacetada. Estes resultados devem-se à diferença do ângulo de ponta das brocas em questão. Os investigadores concluíram ainda que o aumento da  $F_a$  tem ainda um efeito positivo na qualidade do furo, pois reduz o dano térmico verificado nas paredes do furo [Abrão et al., 2007].

Os autores *Lin and Chen, [1996]* verificaram que para valores de  $V_c$  entre os 210 e os 850m/min, a  $F_a$  aumenta de forma significativa, com o aumento da  $V_c$  e que a broca multifacetada, manifesta uma  $F_a$  superior à apresentada pela broca helicoidal.

O aumento da  $V_a$  tem como consequência a rápida deterioração da geometria de corte das ferramentas, o que por sua vez conduz a um aumento da  $F_a$  na operação. Isto explica o facto da broca multifacetada apresentar valores superiores para a  $F_a$  que a broca helicoidal.

Relativamente ao binário ( $M_a$ ), os investigadores explicam que o aumento da  $V_c$ , induz um aumento pouco significativo do mesmo e que na presença de uma  $V_c$  elevada (850m/min) a broca multifacetada apresenta valores de  $M_a$  inferiores aqueles obtidos com broca helicoidal [*Abrão et al., 2007*].

*Chen, [1997]* avaliou a influência da geometria de corte, mais precisamente a influência do ângulo de ponta ( $\sigma$ ), do ângulo de hélice ( $\beta$ ) e dos parâmetros processuais, na  $F_a$  e no  $M_a$ , aquando da furação de compósitos laminados de CFRP's unidireccionais. O investigador concluiu que, a  $F_a$  aumenta quando o ângulo de ponta ( $\sigma$ ) é maior e diminui quando o ângulo de hélice ( $\beta$ ) é maior. Já o  $M_a$ , pode ser considerado inversamente proporcional ao ângulo de ponta ( $\sigma$ ) e ao ângulo de hélice ( $\beta$ ) [*Reis, 2005*].

*Mathew et al., [1999a]*, concluíram que as brocas de trepanação, apresentaram uma redução de 50% da  $F_a$  e de 10% do  $M_a$ , quando comparadas com as brocas helicoidais. Concluíram também que a  $F_a$  e o  $M_a$  aumentaram, com o aumento da  $V_a$ . Contudo, investigadores como *Komanduri, [1993]*; *Piquet et al., [2000]* e *Won and Dharan, [2002a]*, explicam que é possível atingir os 60% de redução da  $F_a$  caso se recorra à técnica de pré-furo [*Reis, 2005*].

*El-Sonbaty et al., [2004]* estudaram o processo de furação, analisando a importância que os parâmetros processuais e o diâmetro da ferramenta têm, na  $F_a$  e  $M_a$ . A gama de valores utilizados para a  $V_c$  situou-se entre os 5,5 e os 46,5m/min e a gama de valores utilizados para a  $V_a$  situou-se entre os 0,05 e os 0,23 mm/rot. Os investigadores concluíram que o aumento da velocidade de avanço ( $V_a$ ) de 0,05 até 0,23mm/rot provoca um aumento considerável da força de avanço ( $F_a$ ), entre os 48 e os 120N. Quanto à velocidade de corte ( $V_c$ ), esta não apresenta influência significativa na força de avanço ( $F_a$ ). No que diz respeito ao  $M_a$ , este diminui com o aumento da  $V_c$  e com a diminuição da  $V_a$ . Quanto ao diâmetro da broca, os investigadores concluíram que o seu aumento, implica um aumento tanto da  $F_a$  como do  $M_a$  [*Reis, 2005*].

*Khashaba, [2004]* investigou a influência dos parâmetros processuais ( $V_c$  e  $V_a$ ) e do tipo de material constituinte do compósito (matriz/reforço), sobre as forças de corte ( $F_a$  e  $M_a$ ) do processo de furação, verificando que a  $F_a$  aumenta em função da  $V_c$ . Esta conclusão é contraditória com uma das conclusões de *El-Sonbaty et al., [2004]* [*Abrão et al., 2007*].

*Tsao, [2008]* apresentou um artigo em que usa brocas do tipo “stepped” para furar compósitos laminados de CFRP’s de 4mm de espessura, com o objetivo de diminuir a  $F_a$  e consequentemente a delaminação [*Shyha et al., 2010*].

*Lazar and Xirouchakis, [2011]*, investigaram a evolução das forças de corte na furação de placas de compósitos laminados de FRP’s, nomeadamente a  $F_a$  e o  $M_a$ , assim como, a sua variação, com a variação dos parâmetros processuais ( $V_a$  e  $V_{rot}$ ). Para o efeito, realizaram ensaios de furação com as seguintes gamas de valores para os parâmetros processuais:  $V_{rot}$  assume os valores de 500, 1650, 3875 e 5000rpm e a  $V_a$  assume os valores de 0,02; 0,08; 0,14 e 0,20. Estes autores afirmam que, as forças de corte máximas surgem no ponto de contacto das placas com a ponta da ferramenta e que o momento em que a ponta da ferramenta atravessa o plano da superfície de saída, é quando provavelmente se dá início à delaminação de saída. Demonstram ainda, que é possível determinar a distribuição das forças tangenciais através do compósito, forças essas que se crê que tenham uma papel preponderante no aparecimento da delaminação. Estes autores acrescentam ainda, que a  $V_{rot}$  parece ter uma maior importância, especialmente no que diz respeito ao  $M_a$  e quando são apenas considerados os valores máximos das forças de corte. Isto deve-se à vibração excessiva, verificada na furação de alta velocidade.

*Krishnaraj et al., [2012]*, estudaram o efeito que os parâmetros processuais ( $V_{rot}$  e  $V_a$ ) têm, sobre a  $F_a$  gerada. Os autores afirmam que, a  $V_a$  é o parâmetro mais influente, na  $F_a$  gerada, na delaminação à saída e no diâmetro real do furo.

A grande maioria dos autores afirma, que o surgimento do fenómeno da delaminação tem como principal causa o uso de uma força de avanço ( $F_a$ ) excessiva durante o processo de furação, sendo que a diminuição desta força resulta numa redução ou eliminação do fenómeno. [*Hocheng and Dharan, 1990; Jain and Yang, 1993; Jain and Yang, 1994; Park et al, 1995; Lin and Chen, 1996; Stone and Kkrishnamurthy, 1996; Chen, 1997; Nobe et al, 1998; Piquet et al, 2000; Zhang et al, 2001a; Lazar and Xirouchakis, 2011*]

Para além do controlo sobre, os parâmetros processuais e a geometria de corte, vários autores têm desenvolvido técnicas de furação que envolvem a utilização de placas de apoio para os compósitos laminados de CFRP's e a realização de um pré-furo de diâmetro inferior ao furo final pretendido. [Komanduri, 1993; Piquet et al, 2000; Won and Dharan, 2002b; Davim and Reis, 2003b; Tsao and Hocheng, 2003; Capello, 2004; Tsao and Hocheng, 2005c]

Estas técnicas, visam a diminuição da  $F_a$  que a ferramenta exerce sobre o compósito laminado de CFRP's. A  $V_a$  utilizada nos ensaios deve ser baixa, devido à natureza frágil das fibras de carbono presentes compósito, mas não tão baixa o suficiente, que permita a elevação excessiva da temperatura de furação. Esta preocupação surge, devido à baixa condutividade térmica dos compósitos laminados de CFRP's.

## 2.4 Delaminagem

Mehta et al., [1992], investigaram o efeito de diferentes geometrias de ferramentas, sobre a delaminagem em compósitos laminados. Para o efeito, determinaram um coeficiente que permitia a quantificação da delaminagem, o rácio de dano ( $D_{RAT}$ ), que é definido pelo quociente entre o diâmetro da área delaminada ( $D_{MAR}$ ) e o diâmetro da área nominal do furo ( $D_{AVG}$ ). Este coeficiente pode ser determinada através da equação 2.1 [Reis, 2005].

---

$$D_{RAT} = \frac{D_{MAR}}{D_{AVG}} \quad (2.1)$$

---

Chambers and Bishop, [1996] estudaram a influência de ferramentas de geometria distintas na delaminagem de compósitos laminados de CFRP's, recorrendo a ensaios de furação com três tipos de broca: a broca helicoidal, a broca do tipo “Dagger” e a broca do tipo “multifacetada”, sendo que de todas, a broca do tipo “Dagger” foi a que pior desempenho apresentou [Reis, 2005].

Para levar a cabo os estudo efetuados em 1997, Chen, [1997] desenvolveu e definiu um coeficiente, para representar quantitativamente a delaminagem num compósito laminado de CFRP's, o fator de delaminagem ( $F_d$ ). Este fator é o quociente entre o diâmetro máximo



da área delaminada ( $D_{max}$ ) e o diâmetro nominal ( $D_{furo}$ ) do furo. Este coeficiente está descrito na equação 2.2 [Reis, 2005].

$$F_d = \frac{D_{max}}{D_{furo}} \quad (2.2)$$

Como referido anteriormente, *Piquet et al.*, [2000] estudaram o efeito de diferentes geometrias de ferramentas de furação, sobre a delaminação em compósitos laminados de CFRP's. Os investigadores destacaram o desempenho da broca especial "OP" devido à ausência quase total de delaminação, imputando este facto à aresta principal de corte da broca em questão. A comparação da geometria desta broca com uma broca helicoidal pode ser vista na figura 2.4 [Abrão et al., 2007].

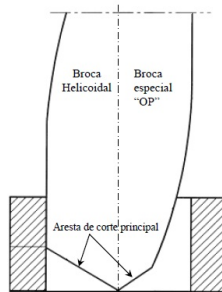


Figura 2.4: Comparação entre a geometrias de corte da broca helicoidal e da broca especial "OP" [Reis, 2005]

Vários autores confirmam a influência positiva, que a colocação de uma placa de apoio para a peça durante a operação de furação tem, sobre a delaminação verificada na peça. [Zhang et al., 2001b; Capello, 2004 e Tsao and Hocheng 2005a]. Estes investigadores concluíram que, independentemente da geometria da broca utilizada, recorrendo a esta técnica, é possível diminuir a  $F_a$  e por conseguinte diminuir a delaminação que surge nos compósitos laminados durante a operação de furação [Reis, 2005].

Como descrito anteriormente, *Davim and Reis*, [2003b] estudaram a delaminação em compósitos laminados de CFRP's, recorrendo a várias geometrias de corte. Os autores

usaram o fator de delaminação definido por *Chen, [1997]* para quantificar a delaminação [*Davim and Reis, 2003b*].

*Tsao and Hocheng, [2005b]* propuseram um modelo matemático, para explicar o efeito da geometria da aresta de corte e da excentricidade da ferramenta, sobre a delaminação em compósitos laminados, concluindo que, a excentricidade contribui para um aumento da  $F_a$  e por conseguinte, para um aumento da delaminação [*Abrão et al., 2007*].

*Tsao and Hocheng, [2005a]* introduziram a tecnologia de tomografia assistida por computador (“*CT scan*”), na medição da delaminação, que ocorre durante a furação de materiais compósitos, usando para o efeito várias ferramentas de geometrias distintas [*Gaitonde et al., 2008*].

Como referido anteriormente, *Hocheng and Tsao, [2006]* estudaram a influência da geometria de corte das ferramentas, na furação de materiais compósitos laminados, quantificando a delaminação através de ecografias dos furos efetuados.

*Davim et al., [2007]* desenvolveram um novo método não destrutivo de medição da delaminação, baseado num software de análise de imagem digital. Propuseram ainda um novo coeficiente de delaminação, ao qual chamaram fator de delaminação adaptado ( $F_{da}$ ). Este coeficiente, além do diâmetro máximo da área delaminada, considera também a própria área delaminada. Na figura 2.5 está representado o processo de análise digital que serve para obter a área delaminada de um furo. Na figura 2.6 é possível comparar ambos os fatores de delaminação bem como visualizar os furos que dão origem aos dados experimentais. A formulação do fator de delaminação adaptado ( $F_{da}$ ) está representada na equação 2.3.

---

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{max} - A_0)}(F_d^2 - F_d) \quad (2.3)$$

---

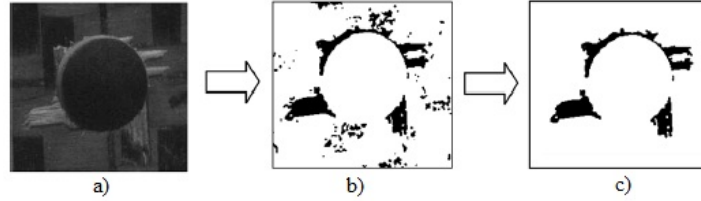


Figura 2.5: Processamento digital das imagens da delaminação: a) Imagem digital inicial; b) Processamento; c) Imagem final binarizada. [Davim et al., 2007]

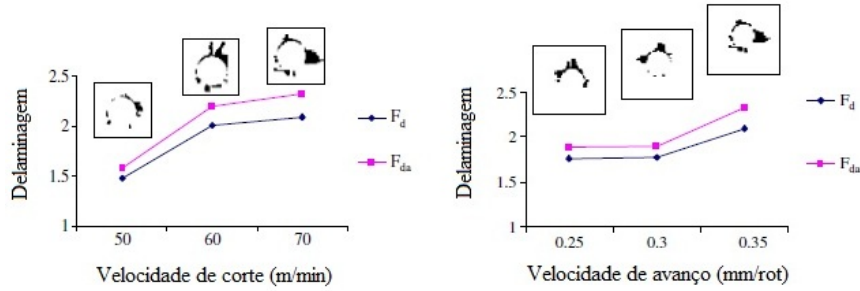


Figura 2.6: Comparação entre  $F_d$  e  $F_{da}$  e a sua variação com os parâmetros processuais. [Davim et al., 2007]

Estes investigadores concluíram que o facto de considerar a área delaminada na quantificação do fator de delaminação é vantajoso, pois representa melhor as variações geométricas dos danos nos compósitos laminados, especialmente nos reforçados por fibra de carbono. [Davim et al., 2007]

Gaitonde et al., [2008] analisaram a influencia dos parâmetros processuais ( $V_{rpm}$  e  $V_a$ ) e do ângulo de ponta ( $\sigma$ ) da ferramenta, sobre a delaminação de compósitos laminados de CFRP's. Os valores calculados do fator de delaminação, juntamente com os três parâmetros de controle acima referidos, servem de variáveis de entrada para um modelo de regressão não linear de segunda ordem, baseado na metodologia matemática “*response surface methodology*” (RSM). O modelo é posteriormente usado, para gerar gráficos de superfícies (3D) e gráficos de curvas de contorno, que demonstram a influencia dos parâmetros de controle sobre o fator de delaminação. Estes gráficos podem ser observados na figura 2.7.

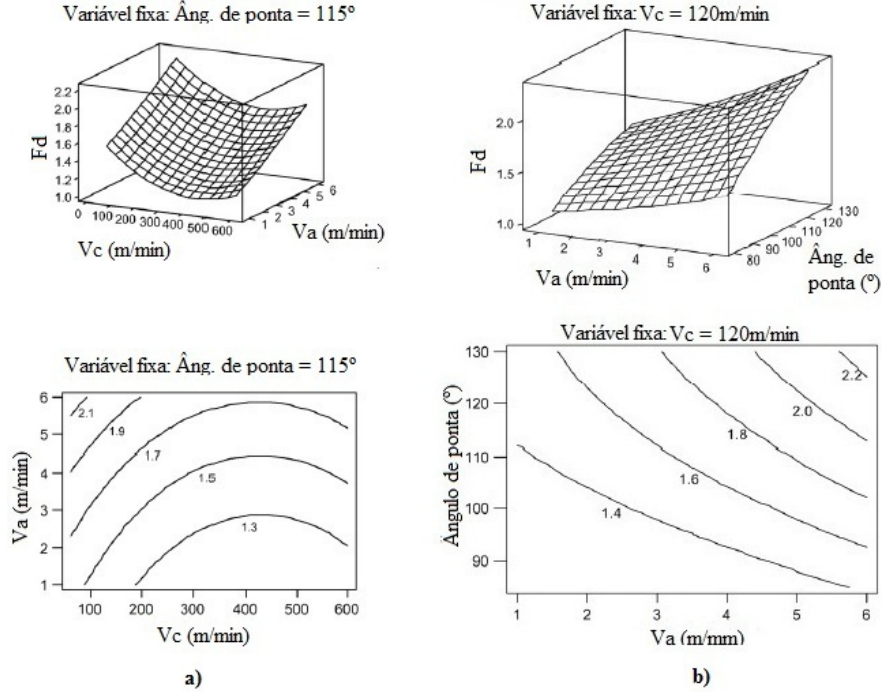


Figura 2.7: Gráficos de superfície e respetivas curvas de contorno. [Gaitonde et al., 2008]

Na figura 2.7a), o  $F_d$  mostra-se altamente sensível às variações da  $V_a$  e mostra-se não linear para uma  $V_c$  fixa. Ainda na figura 2.7a), analisando a curva de contorno, é notório que, mantendo uma  $V_a$  reduzida, é possível obter uma delaminação mínima, se recorrermos a uma  $V_c$  elevada.

Na figura 2.7b), no gráfico de superfície o fator de delaminação ( $F_d$ ) apresenta-se relacionado linearmente tanto com a velocidade de avanço ( $V_a$ ) como com o ângulo de ponta ( $\sigma$ ) [Gaitonde et al., 2008].

No seguimento desta investigação, Karnik et al., [2008] desenvolveram um estudo similar, recorrendo a um algoritmo computacional ANN ou “artificial neural network model”. A influência direta dos parâmetros processuais sobre a delaminação foi analisada, variando um parâmetro de cada vez, enquanto os restantes, eram mantidos constantes num valor central. Foram gerados gráficos de superfície (3D) para as três combinações possíveis entre os parâmetros.

Na figura 2.8a) pode ser vista a influência que a interação, entre a  $V_{rot}$  e a  $V_a$ , tem sobre o fator de delaminação. O parâmetro mantido constante foi o ângulo de ponta da

broca ( $\sigma$ ).

Na figura 2.8b) esta representado o efeito que a interação entre o ângulo de ponta ( $\sigma$ ) e a  $V_a$ , tem sobre o fator de delaminação. O parâmetro mantido constante foi a  $V_{rot}$ .

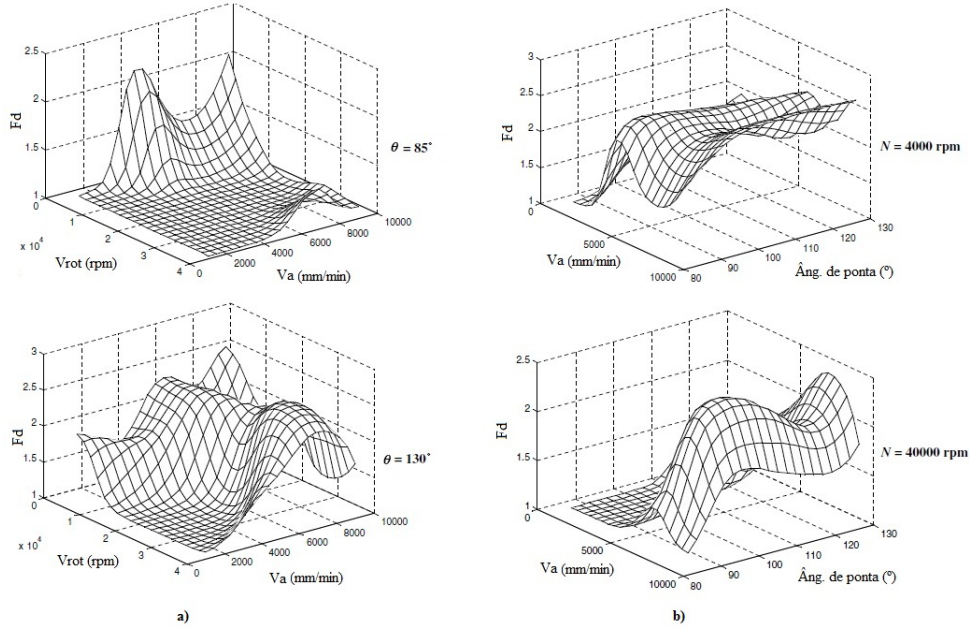


Figura 2.8: Gráficos de superfície. [Karnik et al., 2008]

O modelo corroborou grande parte das conclusões apresentadas por *Gaitonde et al.*, [2008], refutando apenas as ligações de linearidade entre o fator de delaminação e a  $V_a$  e entre o fator de delaminação e o ângulo de ponta ( $\sigma$ ).

*Tsao et al.*, [2011], desenvolveram um novo coeficiente para quantificar a delaminação, o fator de delaminação equivalente, assente nos trabalhos de *Chen* [1997] e *Davim et al.*, [2007]. Este coeficiente é apresentado na equação 2.4 e usa uma razão entre o diâmetro equivalente ( $D_e$ ) e o diâmetro nominal ( $D$ ), em que o diâmetro equivalente é uma média entre o diâmetro máximo e mínimo da área delaminada de um furo e pode ser visto na figura 3.3. Estes autores concluíram ainda, que o recurso a imagens digitais para a avaliação da delaminação, é um método eficaz para o estudo deste fenómeno.

---


$$F_{ed} = \frac{D_e}{D} \quad (2.4)$$


---

Como referido anteriormente, *Krishnaraj et al., [2012]* estudaram a influência de parâmetros processuais ( $V_c$  e  $V_a$ ), na delaminação, na circularidade dos furos e no seu diâmetro. Para quantificar a delaminação, usaram a razão entre a área delaminada ( $A_d$ ) e a área nominal do furo ( $A_0$ ) e este fator está presente na equação 2.5. A área delaminada foi obtida através do processamento de imagens dos furos pelo *software* de imagem “*Image J* ®”.

$$F_d = \frac{A_d}{A_0} \quad (2.5)$$

*Grilo et al., [2012]*, desenvolveram uma investigação com o objetivo de definir valores dos parâmetros processuais ( $V_c$  e  $V_a$ ), para os quais a cadência de produção é maior, visando a redução ou eliminação da delaminação. Para o efeito, utilizaram os dois fatores de delaminação descritos nas equações 2.2 e 2.3 ( $F_d$  e  $F_{da}$ ). A quantificação das áreas delaminadas é obtida recorrendo ao uso do *software* “*Sherlock* ®” e este processo encontra-se representado na figura 2.9. Uma das conclusões deste estudo é a validação de ambos os fatores de quantificação da delaminação ( $F_a$  e  $F_{da}$ ).

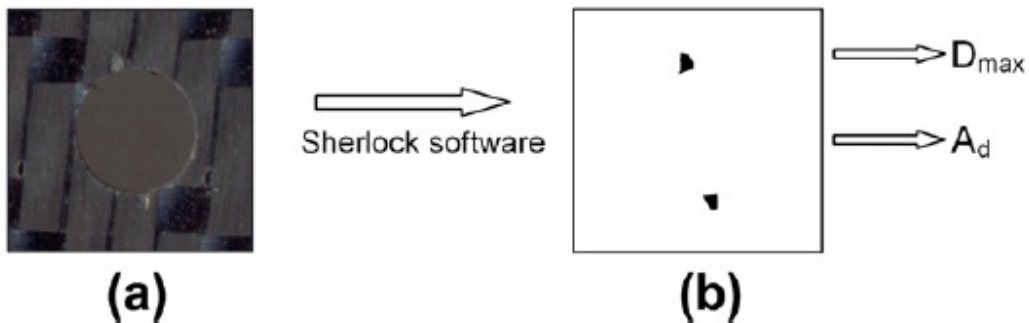


Figura 2.9: Processamento de imagem no “*software*” “*Sherlock* ®”: a) Imagem digital; b) Imagem processada. [*Grilo et al., 2012*]

O estudo da delaminação tem evoluído nos últimos anos. Os investigadores têm recorrido a diversas técnicas de furação de modo a permitir uma maior diversidade de dados obtidos. Também o surgimento de novas tecnologias têm contribuído para esta evolução, sendo agora possível recorrer à análise digital e à análise tomográfica assistida por computador para avaliar o dano infligido nas peças. Os fatores de delaminação também tem evoluído ao longo do tempo, fruto da necessidade de aprimorar a quantificação deste fenómeno e de manter estes fatores a par com a tecnologia emergente.





## Capítulo 3

# Delaminagem na furação de compósitos laminados de CFRP's

### Definição

Existem dois tipos de delaminagem: a delaminagem de entrada ou “*peel-up*” e a delaminagem de saída ou “*push-out*”. Ambos os mecanismos estão representados na figura 3.1 [Grilo *et al.*, 2012].

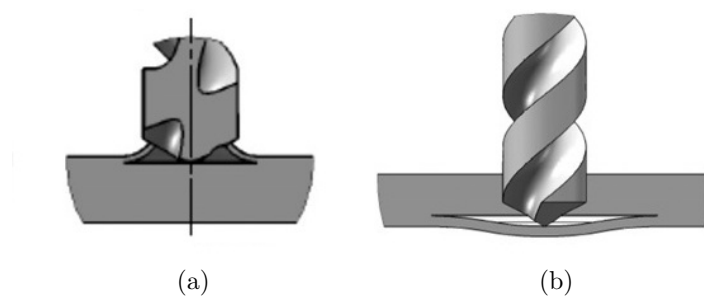


Figura 3.1: Mecanismos de delaminagem: a) Delaminagem de entrada ou “*peel-up*”; b) Delaminagem de saída ou “*push-out*” [Durão *et al.*, 2010].

A delaminagem de entrada é provocada pelo avanço das arestas de corte sobre as primeiras camadas do compósito, de modo a que estas sejam “empurradas” ao longo das faces de corte em vez de serem cortadas. A delaminagem de saída é resultante do efeito de indentação provocado pelo movimento quase-estático da aresta de ponta sobre as últimas camadas do compósito. A delaminagem de saída ocorre a partir do ponto em que a

### CAPÍTULO 3. DELAMINAGEM NA FURAÇÃO DE COMPÓSITOS LAMINADOS DE CFRP'S

---

força de avanço ultrapassa a resistência interlaminar das camadas, provocando assim, o rompimento das mesmas [Grilo *et al.*, 2012].

Para uma melhor compreensão do fenómeno, na figura 3.2 está representada a fotografia de um furo que apresenta uma zona delaminada bastante proeminente.



Figura 3.2: Imagem de entrada de um dos furo obtidos durante o trabalho experimental (ampliação 40x).

#### Fatores de delaminação

Para que se possa quantificar o fenómeno da delaminação, os investigadores recorrem a fatores que têm em linha de conta a área e/ou o diâmetro da zona delaminada. As equações 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 descrevem os fatores de delaminação mais usados pelos investigadores.

---

---

$$F_{dl} = \frac{D_{max}}{D_{furo}} \quad (3.1)$$

---

sendo:  $D_{max}$  o diâmetro máximo da área delaminada e  $D_{furo}$  o diâmetro nominal do furo.

---

---

$$F_{da} = F_d + \frac{A_d}{(A_{max} - A_0)}(F_d^2 - F_d) \quad (3.2)$$

---

sendo:  $A_d$  a área da zona delaminada,  $A_{max}$  a área do círculo com diâmetro máximo da zona delaminada,  $A_0$  área nominal do furo

---



---


$$F_{ed} = \frac{D_e}{D} \quad (3.3)$$


---

sendo:  $D_e$  a média entre o diâmetro máximo e mínimo das zonas delaminadas e  $D$  o diâmetro nominal do furo.

---



---


$$F_d = \frac{A_d}{A_0} \quad (3.4)$$


---

sendo:  $A_d$  a área da zona delaminada e  $A_0$  a área nominal do furo.

A equação 3.1, retirada da literatura de *Chen, W. C., [1997]* descreve o fator de delaminação e recorre apenas a um rácio entre o diâmetro máximo da zona delaminada e o diâmetro nominal do furo. Este fator não considera a área das zonas em questão, recorrendo assim a uma aproximação na forma de avaliar este fenómeno.

A equação 3.2, retirada da literatura de *Davim et al., [2007]*, representa o fator de delaminação adaptado e tenta compensar o erro anteriormente referido, inserindo um coeficiente de adaptação que tem em consideração a área da zona delaminada, a área nominal do furo e a área do círculo com diâmetro máximo da área delaminada.

A equação 3.3, retirada da literatura de *Tsao et al., [2011]*, representa o fator de delaminação equivalente e tem como base as investigações de *Chen, W. C., [1997]* e *Davim et al., [2007]*.

A equação 3.4, retirada da literatura de *Krishnaraj et al., [2012]*, redefine o fator de delaminação, estabelecendo um coeficiente entre a área delaminada e a área nominal do furo, considerando que, sendo possível a determinação destas áreas de forma rigorosa (recorrendo a análise digital de imagem), não é necessário recorrer a medidas de diâmetros das zonas delaminadas.

Na figura 3.3 encontra-se a representação dos parâmetros geométricos que compõem estes fatores.

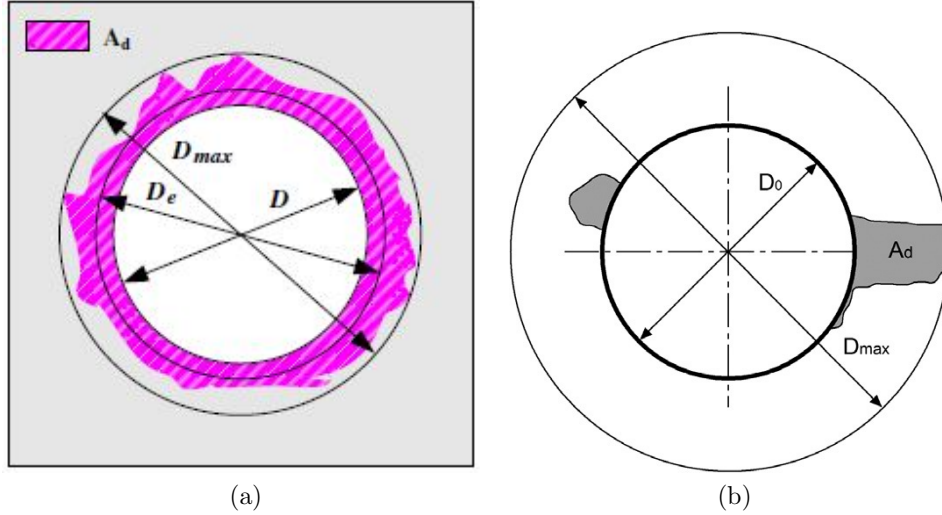


Figura 3.3: Representação dos parâmetros geométricos considerados pelos vários fatores de delaminação: a) Esquema da grandezas que compõem o  $F_{ed}$  [Tsao et al., 2011] b) Esquema da grandezas que compõem o  $F_{ed}$  [Tsao et al., 2011]

O fator utilizado, ao longo deste dissertação, é o presente na equação 3.4, porque é o mais recente da literatura, porque é aquele que melhor se adapta às tecnologias utilizadas e porque permite a quantificação da delaminação recorrendo a apenas duas grandezas, o que possibilita ao software de reconhecimento de imagem ter processamentos menos demorados.

## Capítulo 4

# Trabalho experimental

O trabalho experimental pode ser descrito em três fases distintas. A fase correspondente ao estudo da influência das ferramentas e dos parâmetros processuais sobre a delaminação. A fase correspondente à aplicação de várias técnicas de furação, que visam a diminuição da delaminação ou o estudo da influência de outros materiais (placas de alumínio) presentes no processo de furação, sobre a delaminação. E por fim, a fase associada ao estudo do efeito da temperatura inicial de furação atingida, sobre a delaminação.

Na primeira fase, foram realizados ensaios utilizando as três ferramentas de furação referidas anteriormente (ferramentas A, B e C). Os valores da velocidade de rotação ( $V_{rot}$ ) e da velocidade de avanço ( $V_a$ ) utilizados foram [938; 1875; 3750; 7500]rpm e [0,05; 0,1; 0,2; 0,4]mm/rot respectivamente. Com estes valores foi possível realizar combinações que permitiram o estudo da influência dos parâmetros processuais sobre a delaminação.

Na segunda fase do trabalho experimental, foram utilizadas três técnicas de furação. A técnica do “pré-furo”, que consiste na realização de um furo de menor diâmetro (3mm) à priori do ensaio de furação propriamente dito. A técnica das placas de sacrifício, que consiste na colocação de duas placas de alumínio de 2 mm de espessura, uma junto à superfície de entrada do compósito e a outra junto à superfície de saída. E a técnica de “*sandwich*”, que consiste na colocação de uma placa de alumínio de 2 mm de espessura entre as duas placas de compósito a furar.

O objetivo das duas primeiras técnicas é a diminuição/eliminação da delaminação tanto à entrada como à saída da ferramenta. No caso da terceira técnica, o objetivo é a determinação do efeito da placa de alumínio no processo de furação e o seu eventual efeito

na delaminação do compósito. Os ensaios foram realizados, fixando a  $V_{rot}$  em 3500rpm e variando a  $V_a$  entre os seguintes valores [0,05; 0,1; 0,2; 0,4]mm/rot. Para esta fase do trabalho experimental, foram utilizadas a ferramenta A (“TiN”, 140°) e a ferramenta B (“Diamond”, 120°).

Na terceira fase do trabalho experimental foram realizados ensaios de furação, mais uma vez, fixando o valor da  $V_{rot}$  em 3500rpm e variando a  $V_a$  entre os seguintes valores [0,05; 0,1; 0,2; 0,4]mm/rot. A temperatura atingida na superfície de entrada do compósito durante o início do processo de furação é registrada em tempo real, recorrendo a uma câmara de infravermelho e ao *software* TH71-717 *Data Capture Program*(1394) ver. 2.0C. Para esta fase do trabalho foram utilizadas as ferramentas A e B.

O objetivo desta fase, é determinar a influência da temperatura atingida durante os instantes iniciais da furação, sobre a delaminação de entrada.

Todos os furos efetuados durante os ensaios experimentais, foram analisados e fotografados ao microscópio ótico. A título de exemplo, algumas dessas imagens, estão presentes no anexo 7.3 para consulta.

Foi desenvolvido um programa de análise de imagem recorrendo ao *software* “Sherlock®” de modo a ser possível avaliar a área delaminada e quantificar os fatores de delaminação de cada furo.

## 4.1 Placas de CFRP’s

Os materiais compósitos definem-se como uma mistura ou combinação de dois ou mais macro constituintes que diferem entre si na forma e/ou composição, sendo insolúveis entre si. Os constituintes mantêm a sua identidade e interação entre si de modo a que o material resultante (compósito) apresente um conjunto de propriedades superiores às obtidas pela simples soma das propriedades independentes dos constituintes [Durão, 2013].

No anexo 7.1 encontra-se disponível para consulta, uma descrição pormenorizada dos compósitos laminados de CFRP’s, referindo os seus constituintes, as suas características gerais e propriedades mecânicas.

As placas submetidas ao processo de furação são de compósito laminado de fibra de carbono de matriz polimérica termoendurecível. Nomeadamente resina epóxida reforçada com 55% de fibras de carbono, com 3mm de espessura. O compósito laminado foi obtido

através do processo moldação manual. Apresenta 13 camadas de fibras alternadas, trama de 2x2, com uma orientação de 0 e 90°. Na figura 4.1 está representada, a título de exemplo, uma placa de CFRP's.



Figura 4.1: Placa de compósito laminado de CFRP's

## 4.2 Brocas Helicoidais

As brocas helicoidais são ferramentas de corte por arranque de apara e são utilizadas para realizar furos em quase todo o tipo de materiais.

No anexo 7.2 encontra-se disponível para consulta, uma descrição pormenorizada das brocas helicoidais referindo os seus componentes e definindo as suas características geométricas mais importantes.

Para os ensaios de furação, foram utilizadas as seguintes ferramentas: broca R846-0500-30-A1A 1220 CoroDrill® Delta-C “solid carbide drill”, revestida a “nitreto de titânio” (ferramenta A, “*TiN*”, 140°); broca 856.1-0500-05-A0 N20C CoroDrill® Delta-C “solid carbide drill”, revestida a diamante (ferramenta B, “*Diamond*”, 120°) e broca R415.5-0500-30-AC0 1010 (ferramenta C, convencional, 140°). As primeiras duas ferramentas (“*TiN*”, 140° e “*Diamond*”, 120°) são específicas para a furação de compósitos laminados de CFRP's e a ferramenta C (convencional, 140°) é uma broca para furação de materiais metálicos.

## CAPÍTULO 4. TRABALHO EXPERIMENTAL

Esta última foi utilizada como termo de comparação para o desempenho das ferramentas específicas para CFRP's. Todas as ferramentas foram adquiridas à “Sandvik®” Portugal.

### Ferramenta A ( R846-0500-30-A1A 1220 “TiN”, 140°)

A ferramenta A é de carbonetos sinterizados, revestida a “nitreto de titânio”, tem um ângulo de ponta de 140°, um diâmetro de corte de 5mm e um comprimento útil de 35mm.

Na figura 4.2 encontra-se representada a ferramenta A e na tabela 4.1 estão indicadas as suas características principais. No anexo 7.5 pode ser consultada a ficha do fabricante desta ferramenta.



Figura 4.2: Ferramenta A (“TiN”, 140°)

Tabela 4.1: Características principais da ferramenta A. [*Sandvik Portugal a*]

| R846-0500-30-A1A 1220 CoroDrill® |                              |                             |
|----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
| CZC                              | Cód. Tamanho conexão         | 6                           |
| DC                               | Diâmetro de corte            | 5mm                         |
| LU                               | Comp. útil                   | 35mm                        |
| OAL                              | Comp. total                  | 66mm                        |
| LCF                              | Comp. do canal p/ cavacos    | 44mm                        |
| PL                               | Comp. de ponta               | 0,909926mm                  |
| SIG                              | Ângulo de ponta              | 140°                        |
| OHX                              | Balanço máximo               | 46mm                        |
| BSG                              | Grupo básico standard        | DIN 6537 L                  |
| TCHA                             | Tolerância atingível de furo | H9                          |
| CNSC                             | Cód. Entrada de refrigeração | 1:entrada axial concêntrica |



**Ferramenta B** (856.1-0500-05-A0 N20C “*Diamond*”, 120°)

A ferramenta B é de carbonetos sinterizados, revestida a diamante, tem um ângulo de ponto de 120°, um diâmetro de corte de 5mm e um comprimento útil de 35mm.

Na figura 4.3 encontra-se representada a ferramenta B e na tabela 4.2 estão indicadas as suas características principais. No anexo 7.5 encontra-se a ficha do fabricante desta ferramenta.



Figura 4.3: Ferramenta B (“*Diamond*”, 120°)

Tabela 4.2: Características principais da ferramenta B. [*Sandvik Portugal b*]

| <b>856.1-0500-05-A0 N20C CoroDrill®</b> |                              |                    |
|---|------------------------------|--------------------|
| CZC                                     | Cód. Tamanho da conexão      | 6                  |
| DC                                      | Diâmetro de corte            | 5 mm               |
| LU                                      | Comp. útil                   | 35 mm              |
| OAL                                     | Comp. total                  | 82 mm              |
| LCF                                     | Comp. do canal p/ cavacos    | 44 mm              |
| PL                                      | Comp. da ponta               | 2.63 mm            |
| SIG                                     | Ângulo da ponta              | 120°               |
| OHX                                     | Balanço máximo               | 46 mm              |
| BSG                                     | Grupo básico standard        | DIN 6537 L         |
| TCHA                                    | Tolerância atingível do furo | H9                 |
| CNSC                                    | Cód. Entrada de refrigeração | 0: s/ refrigeração |

**Ferramenta C** (R415.5-0500-30-AC0 1010 convencional, 140°)

A ferramenta C é de carbonetos sinterizados, tem um ângulo de ponta de 140°, um diâmetro de corte de 5mm e um comprimento útil de 35mm.

Na figura 4.4 encontra-se representada a ferramenta C e na tabela 4.3 estão indicadas as suas características principais. No anexo 7.5 encontra-se a ficha do fabricante desta ferramenta.



Figura 4.4: Ferramenta C (convencional, 140°)

Tabela 4.3: Características principais da ferramenta C. [*Sandvik Portugal c*]

| R415.5-0500-30-AC0 1010 CoroDrill® |                              |                    |
|------------------------------------|------------------------------|--------------------|
| CZC                                | Cód. de tamanho da conexão   | 6                  |
| DC                                 | Diâmetro de corte            | 5 mm               |
| LU                                 | Comp. útil                   | 35 mm              |
| OAL                                | Comp. total                  | 66 mm              |
| LCF                                | Comp. do canal p/ cavacos    | 44 mm              |
| PL                                 | Comp. da ponta               | 0.84 mm            |
| SIG                                | Ângulo da ponta              | 140°               |
| OHX                                | Balanço máximo               | 46 mm              |
| BSG                                | Grupo básico standard        | DIN 6537 L         |
| TCHA                               | Tolerância atingível do furo | H9                 |
| CNSC                               | Cód. entrada de refrigeração | 0: s/ refrigeração |

### 4.3 Centro de maquinagem

Os ensaios de furação foram realizados no centro de maquinagem MIKRON VCE 500<sup>®</sup>, que se encontra instalado no Laboratório de Tecnologia Mecânica, do Departamento de Engenharia Mecânica, da Universidade de Aveiro e está representado na figura 4.5. O centro de maquinagem tem uma potência máxima de 11kW, uma velocidade máxima de rotação da árvore de 7500rpm, um controlador HASS e um armazém com capacidade para 20 ferramentas de corte. No anexo 7.6 estão as principais características deste centro de maquinagem.



Figura 4.5: Centro de maquinagem MIKRON VCE<sup>®</sup>



## 4.4 Sistema de apoio das placas

Para possibilitar a realização dos ensaios de furação foi necessário recorrer a um suporte de furação. O objetivo do uso do suporte é, para além da fixação das placas, permitir manter o apoio de cada furo constante ao longo de todos os ensaios. O sistema de suporte em questão pode ser visto na figura 4.6.

O diâmetro dos furos do suporte de furação é constante e tem o valor de 10mm. Em cada ensaio de furação, a ferramenta é alinhada com o centro de um dos furos do suporte, mantendo assim o braço de força entre a ponta da ferramenta e a extremidade do suporte constante em todos os ensaios de furação.

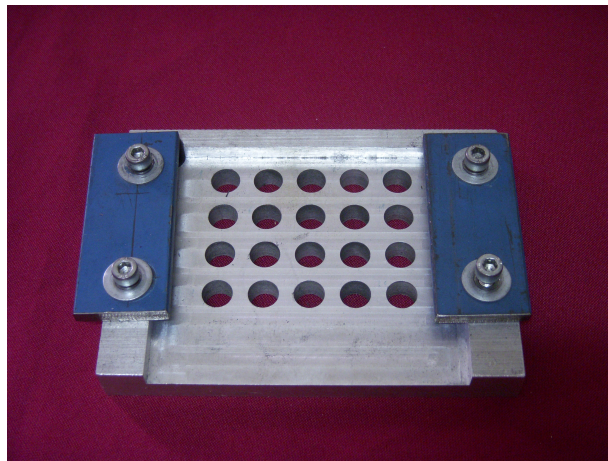


Figura 4.6: Suporte de furação

## 4.5 Ensaaios

### 4.5.1 Estudo dos parâmetros processuais

Para levar a cabo o estudo dos parâmetros processuais ( $V_a$  e  $V_{rot}$ ), foram efetuadas as combinações presentes na tabela 4.4. O objetivo destas combinações, é o estudo da influência da variação, quer da  $V_a$ , quer da  $V_{rot}$  sobre a delaminação. Para cada combinação foram efetuados dois ensaios.

Tabela 4.4: Combinações dos parâmetros processuais

| Parâmetros Processuais |                |
|------------------------|----------------|
| $V_{rot}$ [rpm]        | $V_a$ [mm/rot] |
| 938                    | 0,05           |
|                        | 0,1            |
|                        | 0,2            |
|                        | 0,4            |
| 1875                   | 0,05           |
|                        | 0,1            |
|                        | 0,2            |
|                        | 0,4            |
| 3750                   | 0,05           |
|                        | 0,1            |
|                        | 0,2            |
|                        | 0,4            |
| 7500                   | 0,05           |
|                        | 0,1            |
|                        | 0,2            |
|                        | 0,33           |

A combinação entre o valor da  $V_{rot}$  máxima (7500rpm) e a  $V_a$  máxima (0,4mm/rot) não foi possível de realizar. Isto deveu-se aos limites de trabalho do centro de maquinagem.

Estes parâmetros processuais foram testados recorrendo às três ferramentas de furação disponíveis (ferramenta A, B, e C). Na figura 4.7 é possível observar uma placa de CFRP's a meio de um ensaio de furação.

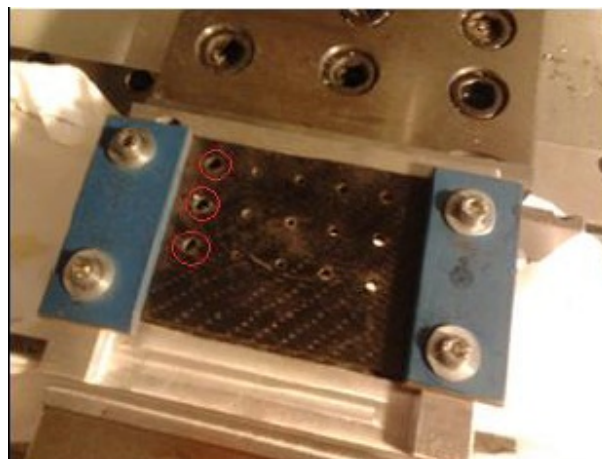


Figura 4.7: Placa de CFRP's após alguns ensaios de furação

### 4.5.2 Estudo de diferentes técnicas de furação

Para desenvolver o estudo das diferentes técnicas de furação, foram utilizados os parâmetros processuais presentes na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Valores dos parâmetros processuais usados nas três técnicas de furação

| Vrot [rpm] | Va [mm/min] |
|------------|-------------|
| 3750       | 0,05        |
| 3750       | 0,1         |
| 3750       | 0,2         |
| 3750       | 0,4         |

Nesta fase, foram apenas utilizadas as ferramentas A (“*TiN*”, 140°) e B (“*Diamond*”, 120°) e para cada combinação de valores foram realizados dois ensaios.

No caso da técnica de pré-furo, é feito um furo de 3mm de diâmetro à priori do ensaio de furação.

Para a técnica das placas de sacrifício, foram colocadas placas de alumínio de 2mm de espessura junto às superfícies de entrada e saída, antes de se proceder aos ensaios de furação. Na figura 4.8 pode ver-se a representação desta técnica.

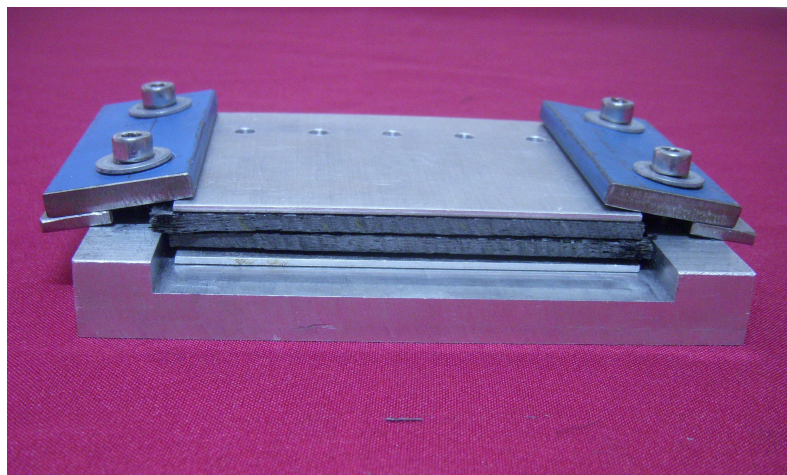


Figura 4.8: Técnica das placas de sacrifício

No caso da técnica de “*sandwich*” foi colocada uma placa de alumínio de 2mm de espessura entre as placas a furar, antes de se proceder aos ensaios de furação. Na figura 4.9 pode ver-se a representação desta técnica.

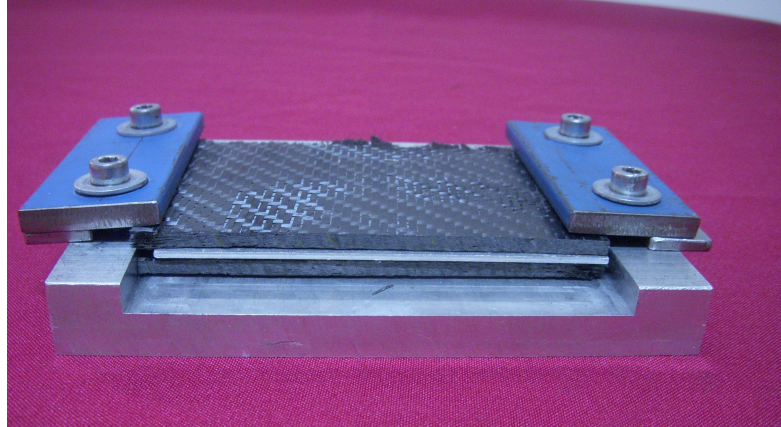


Figura 4.9: Técnica de “sandwich”

### 4.5.3 Estudo da temperatura de início de furação

Para levar a cabo o estudo da influência da temperatura de início de furação sobre a delaminação de entrada, foram utilizados os parâmetros processuais presentes na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Valores dos parâmetros processuais para os ensaios de medição de temperatura

| Vrot [rpm] | Va [mm/min] |
|------------|-------------|
| 3750       | 0,05        |
| 3750       | 0,1         |
| 3750       | 0,2         |
| 3750       | 0,4         |

Foram realizados dois tipos de ensaios, um em que a ferramenta inicia cada furo à mesma temperatura inicial, de aproximadamente 18 °C, e outro em que não é dado tempo à ferramenta para arrefecer entre cada ensaio. O objetivo do primeiro é retirar conclusões sobre a temperatura de início de furação, relativamente à delaminação de entrada, enquanto o segundo pretende simular a utilização de uma ferramenta em ambiente industrial, onde não ocorrem patamares de arrefecimento entre a realização de cada furo.

Os valores de temperatura considerados, são os valores máximos de temperatura captados em cada “frame”<sup>1</sup> e são considerados apenas os “frames” captados durante os instantes iniciais do processo de furação.

---

<sup>1</sup>1 frame =  $\frac{1}{30}$  segundos

O número de “frames” a selecionar foi calculado através da velocidade de avanço e do comprimento de ponta da broca (PL), sabendo que a câmara efetua a gravação a uma taxa de 30 “frames” por segundo. Deste modo, os dados recolhidos são referentes à ação da aresta de corte sobre a placa. Assim, as temperaturas consideradas são aquelas que influenciam o fenómeno da delaminação na entrada da placa e não a temperatura máxima atingida durante todo o processo de furação.

## 4.6 Aquisição de dados de imagem e temperatura

### 4.6.1 Reconhecimento de imagem

Para a avaliação da delaminação, foi elaborado um algoritmo de reconhecimento de imagem recorrendo ao software “*Sherlock*®”. Através do qual é possível quantificar as áreas delaminadas do compósito. Para facilitar a identificação por parte do *software* dessas mesmas áreas, recorreu-se a uma técnica de coloração manual, que consiste na coloração de toda a área circundante do furo. Devido à diferença de rugosidade entre a superfície delaminada e a não delaminada, o colorante adere fortemente à área de interesse, sendo de fácil remoção na área não delaminada.

De seguida, foram obtidas imagens digitais das placas, através de um “*scanner*” (HP, F2200Series) com uma resolução de 1200ppp’s (pontos por polegada) verticais e horizontais, sendo posteriormente “inseridas” no programa de reconhecimento de imagem desenvolvido. O programa pode ter diversas variáveis de saída, nomeadamente, o número de pixels que compõem a área delaminada de cada furo e o número de pixels que compõem a área de cada furo. Estas variáveis de saída permitiram a quantificação da delaminação, tendo sido utilizadas como variáveis de entrada para a equação 3.4, que define o fator de delaminação redefinido por *Krishnaraj et al.*, [2012] e usado nesta dissertação.

Na figura 4.10 é possível ver as diversas fases da técnica de coloração e na figura 4.11 é possível ver as várias fases de processamento do algoritmo elaborado.



#### 4.6. AQUISIÇÃO DE DADOS DE IMAGEM E TEMPERATURA

---



Figura 4.10: As diversas fases da técnica de coloração



Figura 4.11: As diversas fases do algoritmo de processamento de imagem

##### 4.6.2 Sistema de aquisição de dados de temperatura

Para efetuar a aquisição de dados de temperatura, recorreu-se ao *setup* experimental presente na figura 4.12. Este *setup* é composto por uma câmara de infravermelhos e um *software* de gravação em tempo real, que permite o registo da temperatura atingida na superfície de entrada do compósito.

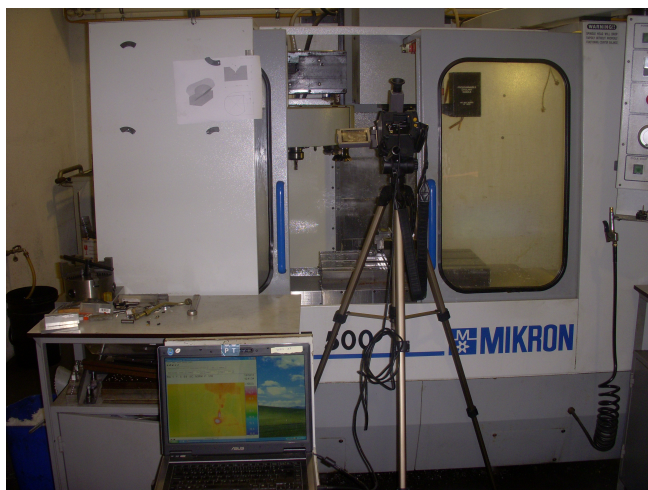


Figura 4.12: “*Setup*” experimental de aquisição de dados de temperatura

A câmara é a “*Thermo Tracer TH9100MLN/WLN*” da “*NEC*” cujas especificações pode sem consultadas em <http://www.infrared.avio.co.jp/en/products/ir-thermo/lineup/>

## CAPÍTULO 4. TRABALHO EXPERIMENTAL

[th9100mln-wln/index.html](http://th9100mln-wln/index.html). Esta câmara permite a gravação de imagem, tanto na gama de infravermelhos como na gama da luz visível.

O registo dos dados fornecidos pela câmara foi efetuado, recorrendo ao *software* TH71-717 *Data Capture Program*(1394) ver. 2.0C, que permitiu a gravação em tempo real dos dados de temperatura, bem como, a calibração e operação remota da câmara.

A posterior visualização e manipulação dos dados obtido pelo *software* de gravação, ficou a cargo do *software* *Thermal Replay* ver. 1.0.1.9. Na figura 4.13 encontra-se uma sequência de imagens deste *software* em funcionamento.

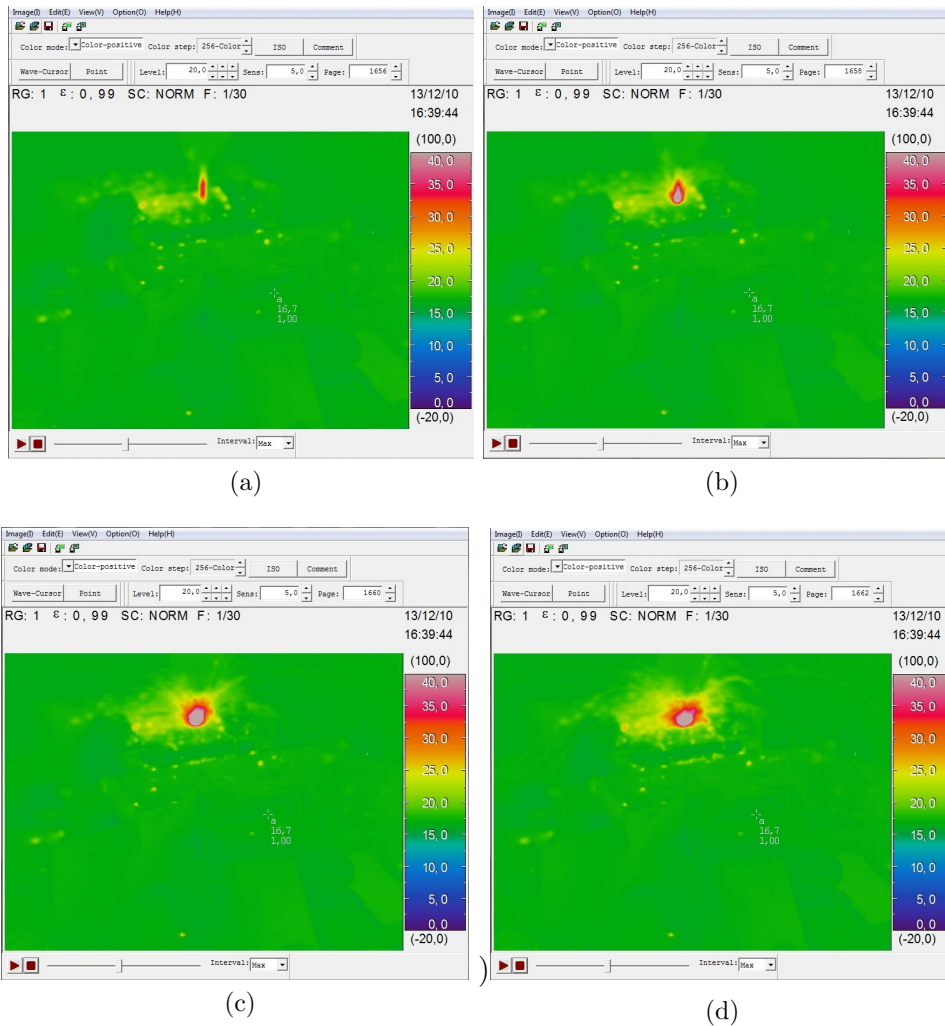


Figura 4.13: Interface gráfico do *software* *Thermal Replay* ver. 1.0.1.9:

- a) início do processo de furação; b) processo de furação dois “frames” após início;
- c) processo de furação quatro “frames” após início; d) processo de furação seis “frames” após início.

#### 4.6. AQUISIÇÃO DE DADOS DE IMAGEM E TEMPERATURA

---

De modo a validar os valores de temperatura obtidos, através deste *setup* experimental, recorreu-se a um termopar para medir a temperatura da superfície da placa nos instantes que antecedem o processo de furação.



# Capítulo 5

## Resultados e sua discussão

### 5.1 Parâmetros processuais

#### 5.1.1 Velocidade de avanço

##### Delaminagem de entrada

Quanto à análise da delaminagem de entrada e através da visualização dos gráficos presentes na figura 5.1 e 5.2, é possível verificar que o fator de delaminagem aumentou, com o aumento da velocidade de avanço ( $V_a$ ). Esta tendência verificou-se para as três ferramentas testadas e para as quatro velocidades de rotação ( $V_{rot}$ ) utilizadas.

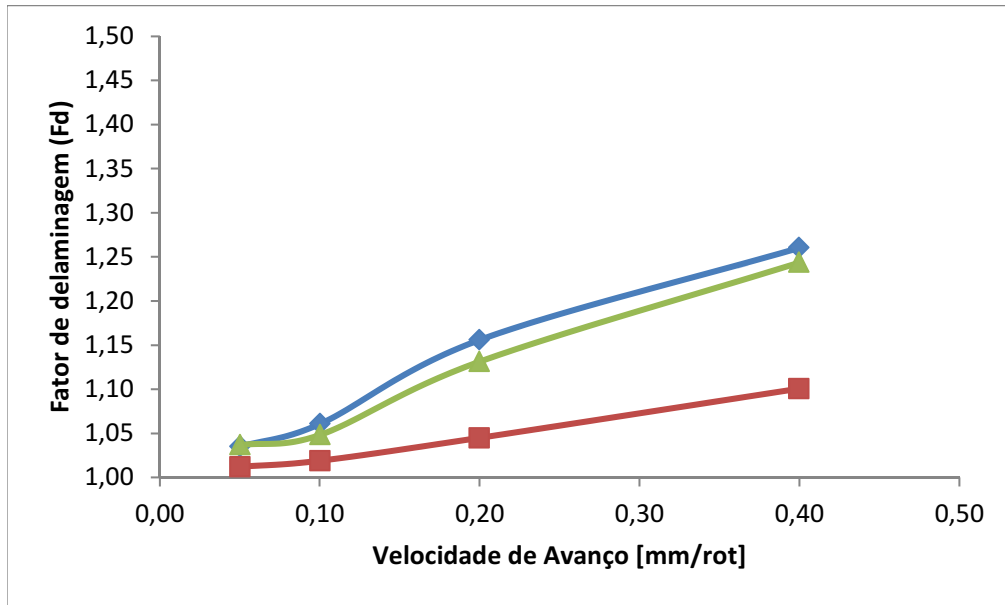
A ferramenta A (“*TiN*”,  $140^\circ$ ), com uma  $V_a$  de 0,4mm/rot e uma  $V_{rot}$  de 1875rpm, apresentou o pior desempenho com um fator de delaminagem de 1,432 (figura 5.1b).

A ferramenta que teve o melhor desempenho foi a ferramenta B (“*Diamond*”,  $120^\circ$ ), que apresentou valores do fator de delaminagem sempre abaixo dos valores apresentados tanto pela ferramenta A (“*TiN*”,  $140^\circ$ ) como pela ferramenta C (convencional,  $140^\circ$ ).

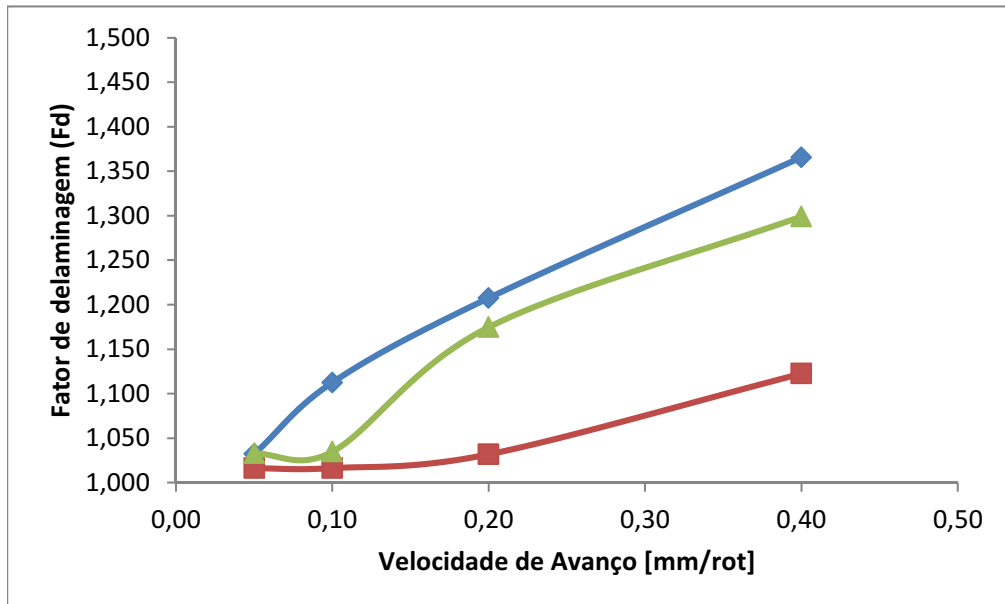
De realçar que para uma  $V_a$  baixa (0,05mm/rot), não se verificaram variações significativas no fator de delaminagem apresentado pelas três ferramentas e que essas variações tiveram tendência a aumentar com o aumento da  $V_a$ , o que é considerado normal, pois a maioria dos autores (*Piquet et al, 2000; Ramulu et al, 2001; Won and Dharan, 2002b; Davim and Reis, 2003a; Davim et al, 2004a; El-Sonbaty et al, 2004; Khashaba, 2004; Tsao and Hocheng, 2004; Langela et al, 2005; Mohan et al, 2005; Singh et al, 2005a; Singh et al, 2005b; Tsao and Hocheng, 2005c; Karnik et al., 2008*) defende, que o aumento da  $V_a$  provoca o aumento da  $F_a$  que por sua vez provoca o aumento da delaminagem de entrada.

Considera-se assim que os resultados obtidos estão em sintonia com os valores encon-

trados na literatura de autores como: *Davim and Reis, [2003a]*; *Davim and Reis, [2003b]*; *Tsao and Hocheng, [2005]*; *Gaitonde et al., [2008]* e *Karnik et al., [2008]*.

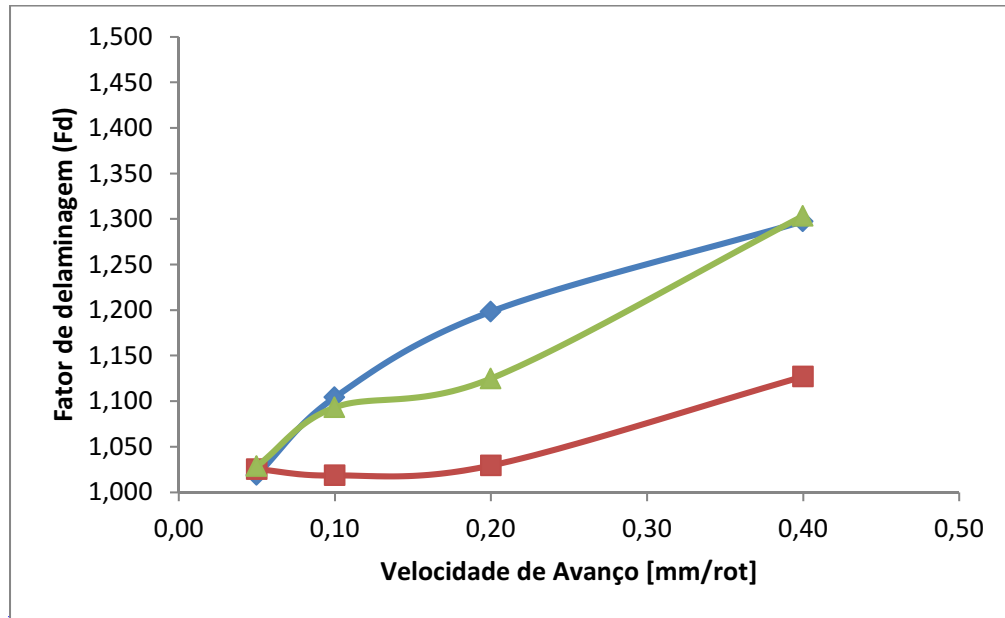


(a) ◆ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

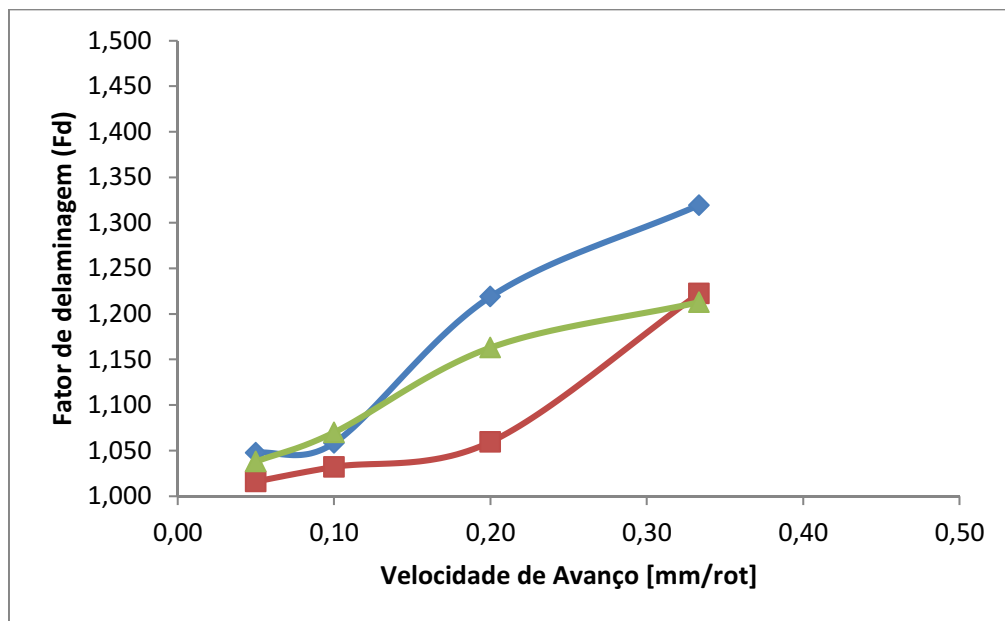


(b) ◆ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

Figura 5.1: Fator de delaminação de entrada em função da velocidade de avanço: a) Velocidade de rotação de 938rpm; b) Velocidade de rotação de 1875rpm;



(a) ♦ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)



(b) ♦ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

Figura 5.2: Fator de delaminação de entrada em função da velocidade de avanço:  
a) Velocidade de rotação de 3750rpm; b) Velocidade de rotação de 7500rpm.

### Delaminagem de saída

Através da comparação dos gráficos das figuras 5.1 e 5.2 com os gráficos das figuras 5.3 e 5.4 é possível verificar que a delaminagem de entrada e de saída não variaram da mesma forma, em função da  $V_a$ . A delaminagem de entrada aumentou com o aumento da  $V_a$ , no entanto para delaminagem de saída o mesmo não se verificou.

O desempenho das ferramentas apresentou-se nivelado de outra forma, a ferramenta B (“*Diamond*”, 120°) apresentou melhor desempenho que a ferramenta A (“*TiN*”, 140°), que por sua vez apresentou melhor desempenho que a ferramenta C (convencional, 140°).

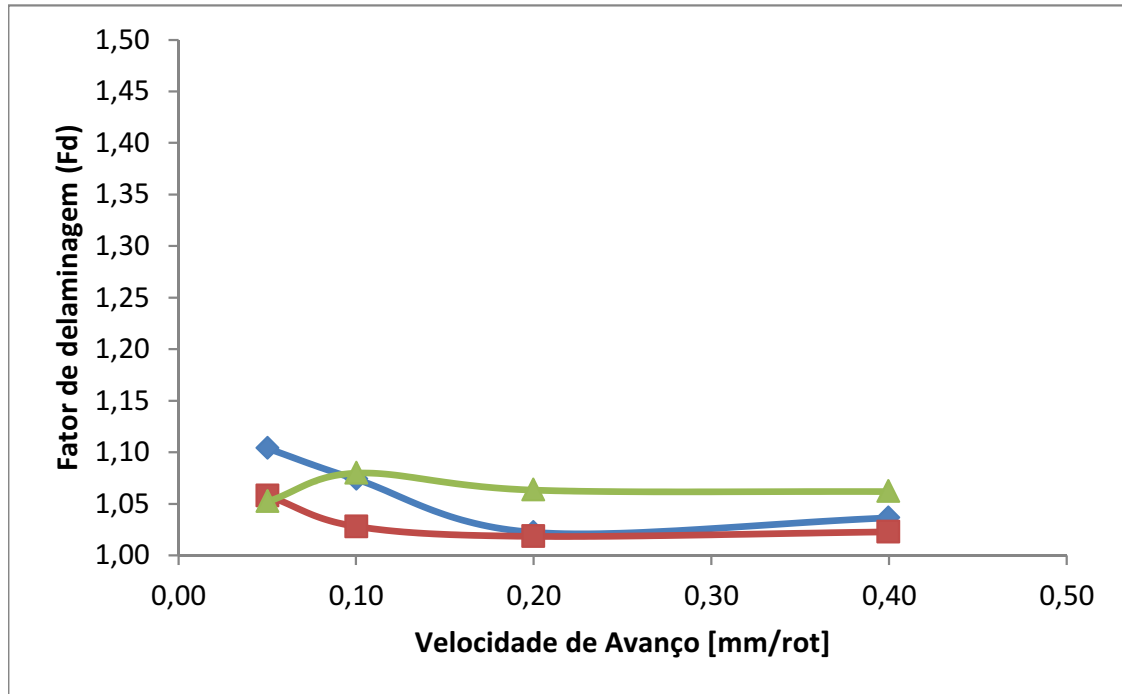
As ferramentas A (“*TiN*”, 140°) e B (“*Diamond*”, 120°) apresentaram valores de delaminagem de saída bastante similares, como se pode verificar pela proximidade das suas curvas, cuja tendência é para se manterem constantes com o aumento da  $V_a$ .

A ferramenta que apresentou melhor desempenho, referente à delaminagem de saída, para todas as gamas de velocidades testadas, foi a ferramenta B (“*Diamond*”, 120°), tal como aconteceu para a delaminagem de entrada.

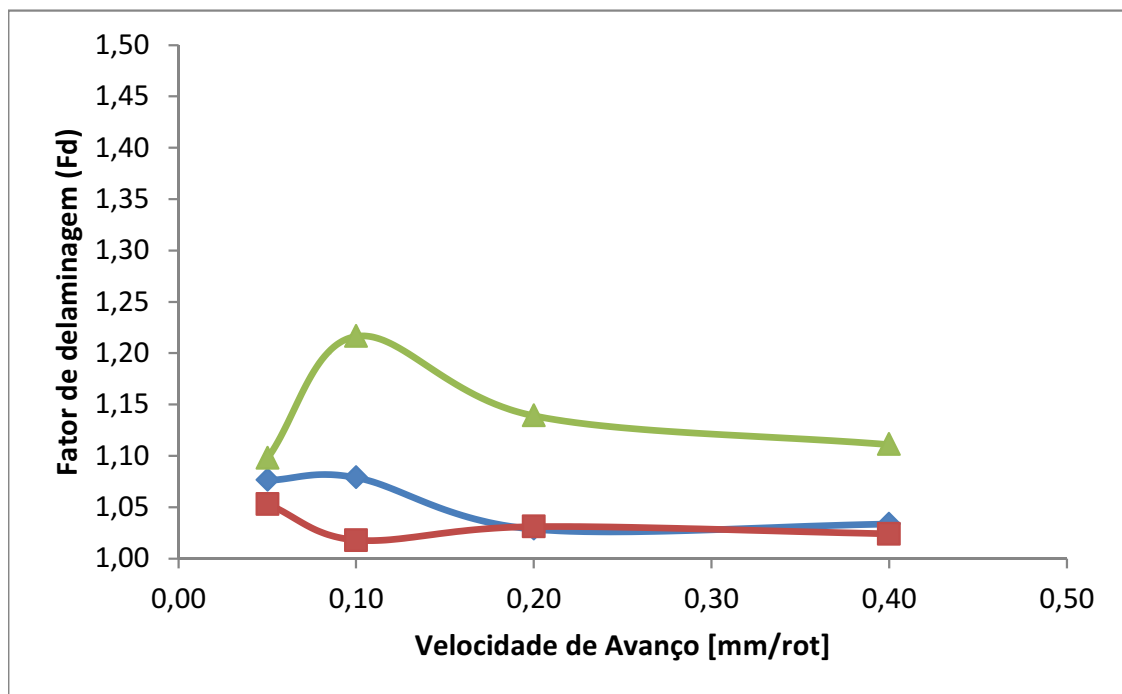
A ferramenta C (convencional, 140°) apresentou, de um modo geral, resultados com uma tendência similar aos resultados apresentados pela ferramenta A (“*TiN*”, 140°) e pela ferramenta B (“*Diamond*”, 120°). Exceção feita aos ensaios realizados a uma  $V_a$  de 0,1mm/rot e a uma  $V_{rot}$  de 1875rpm, cujos valores de delaminagem foram muito elevados (figura 5.3b). Após a análise dos furos realizados nestes ensaios, é credível associar estes valores de delaminagem, com defeitos presentes na superfície do compósito, consequentes do processo de moldação manual das placas. Um destes furos pode ser visto na imagem presente no anexo 7.4. Estes defeitos provocam um aumento súbito da delaminagem, pois quando a aresta de corte da ferramenta entra em contacto com uma descontinuidade da superfície, provoca o arrancamento de uma parte do compósito e não o corte do material como seria pretendido.

Apesar de os valores da delaminagem de saída nem sempre serem referidos na literatura, foi possível verificar que, os resultados obtidos não estão de acordo com as conclusões apresentadas por Krishnaraj *et al.*, [2012], que concluem que a  $V_a$  é o parâmetro que mais influência direta tem, na delaminagem de saída. Os resultados apresentados por Grilo *et al.*, [2012], estão mais próximos dos resultados obtidos neste trabalho, visto que a delaminagem de saída apresenta uma tendência pouco clara e com valores muito similares para a  $V_a$  máxima e mínima testada, em especial a broca R950.



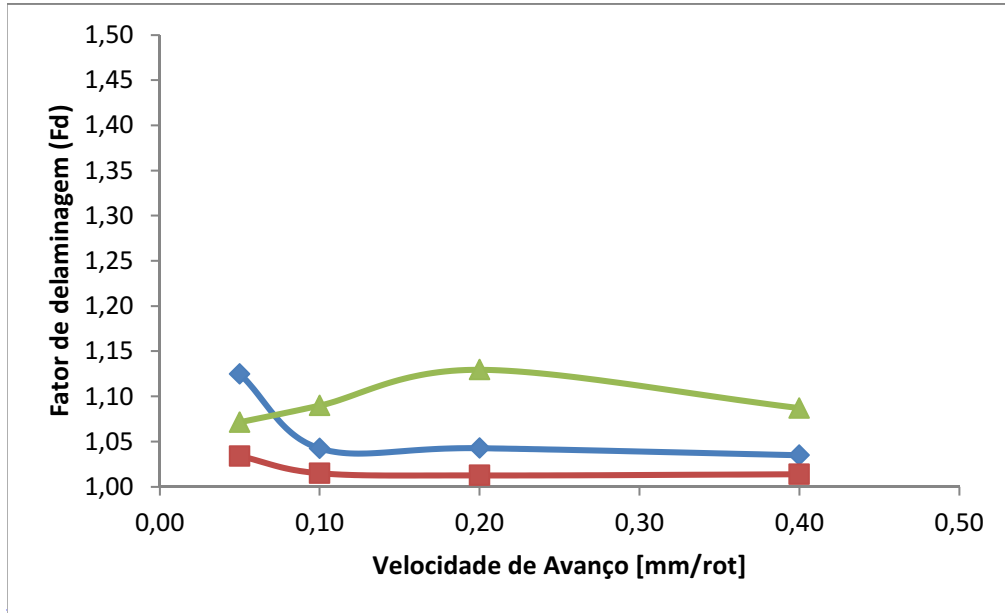


(a) ♦ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

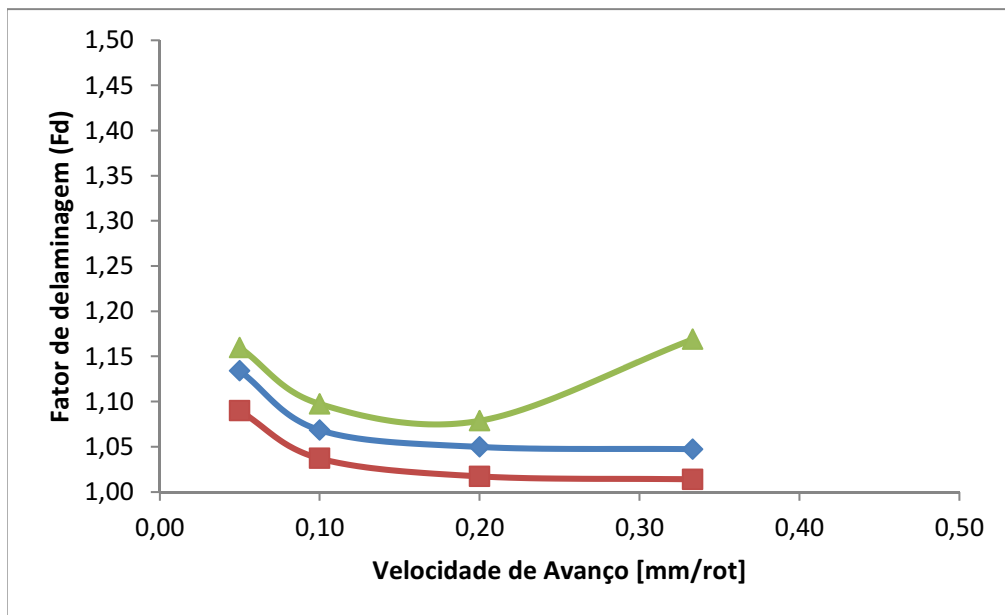


(b) ♦ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

Figura 5.3: Fator de delaminação de saída em função da velocidade de avanço: a) Velocidade de rotação de 938rpm; b) Velocidade de rotação de 1875rpm;



(a) ◆ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)



(b) ◆ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

Figura 5.4: Fator de delaminação de saída em função da velocidade de avanço:  
a) Velocidade de rotação de 3750rpm; b) Velocidade de rotação de 7500rpm.

### Delaminagem de entrada *versus* delaminagem de saída

Na figura 5.5 é efetuada a comparação entre a entrada e a saída de furos realizados com a ferramenta A (“*TiN*”, 140°) e a ferramenta B (“*Diamond*”, 120°).

Nas figuras 5.6 e 5.7, é visível a comparação entre o fator de delaminagem de entrada e o fator de delaminagem de saída em função da velocidade de avanço. Estes gráficos servem, para estabelecer uma comparação quantitativa entre a delaminagem à entrada e à saída do furo.

Podemos verificar que, a uma  $V_a$  baixa (0,05mm/rot) e para qualquer  $V_{rot}$  utilizada, o fator de delaminagem de saída foi sempre superior ao fator de delaminagem de entrada, para as três ferramentas testadas. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos por Krishnaraj *et al.*, [2012], cujos valores da delaminagem de entrada se apresentaram inferiores aos valores da delaminagem de saída durante a vida útil das ferramentas testadas.

No caso das comparações efetuadas a uma  $V_a$  de 0,2mm/rot e para toda a gama de valores da  $V_{rot}$  utilizada, 10 em cada 12 testes, apresentaram um fator de delaminagem de saída inferior ao fator de delaminagem de entrada, para as três ferramentas testadas.

Podemos verificar que, a uma  $V_a$  elevada (0,4mm/rot) e para qualquer  $V_{rot}$  utilizada, o fator de delaminagem de saída é sempre inferior ao fator de delaminagem de entrada, para as três ferramentas testadas. Estes resultados estão de acordo com os resultados obtidos por Grilo *et al.*, [2012], que mostram que a delaminagem de entrada é superior à delaminagem de saída para ambas as ferramentas testadas, a uma  $V_a$  elevada.

Após a análise visual dos furos efetuados, verificou-se que a forma geométrica das áreas delaminadas tanto na entrada, como na saída, é bastante idêntica. Este resultado esta concordante com as conclusões de Shyha *et al.*, [2009].

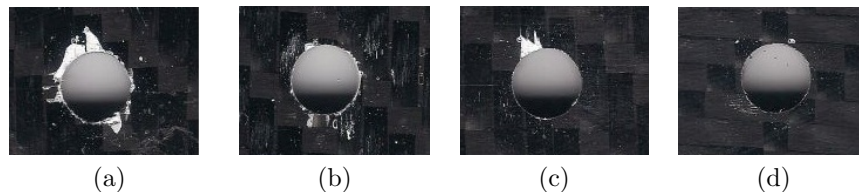
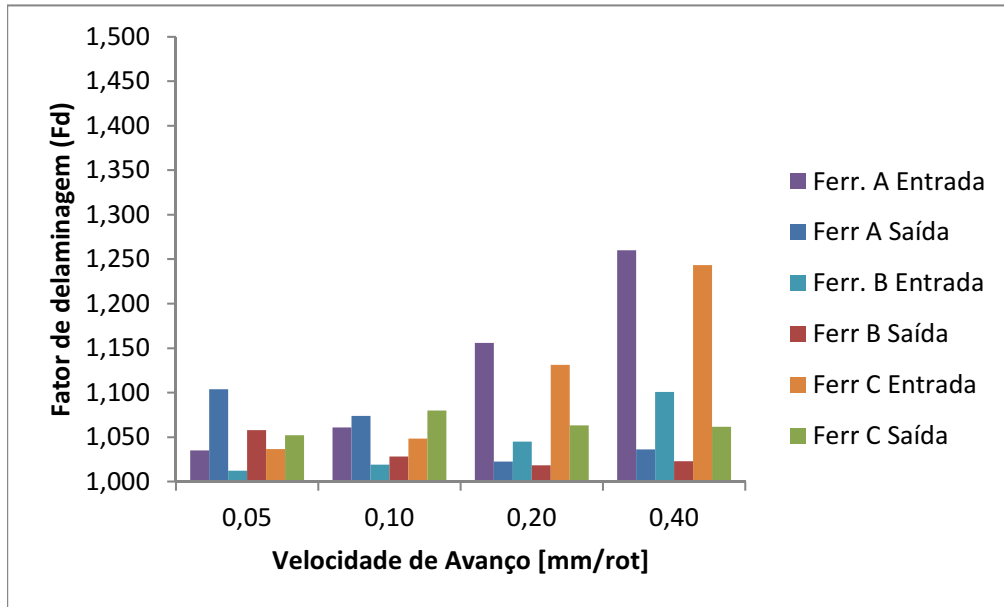
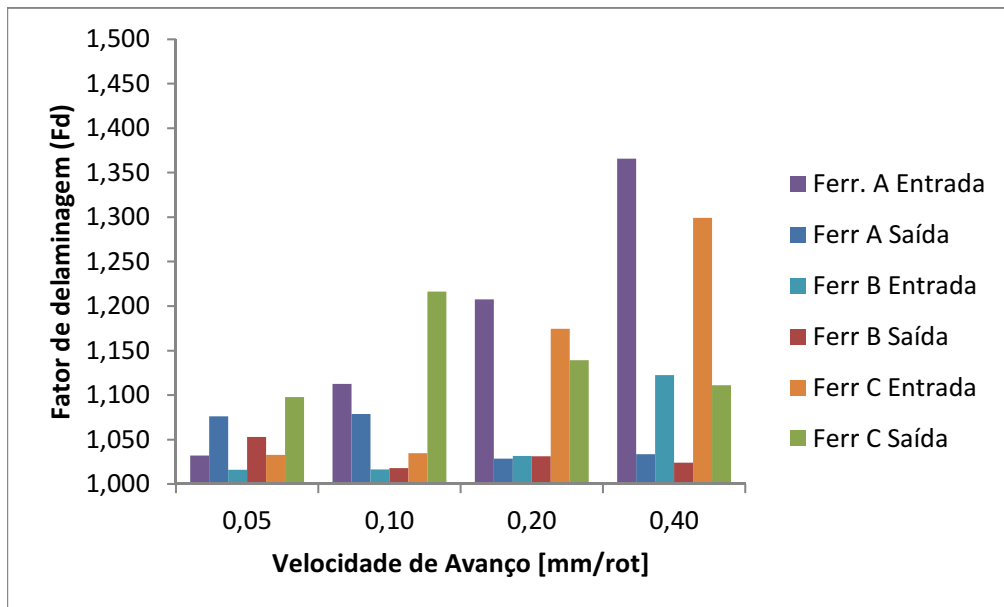


Figura 5.5: Comparação entre a delaminagem de entrada e a delaminagem de saída de furos efetuados com uma  $V_a$  de 0,2mm/rot e uma  $V_{rot}$  de 7500rpm.

a) Entrada de um furo efetuado com a ferramenta A; b) Saída de um furo efetuado com a ferramenta A  
c) Entrada de um furo efectuado com a ferramenta B; d) Saída de um furo efetuado com a ferramenta B



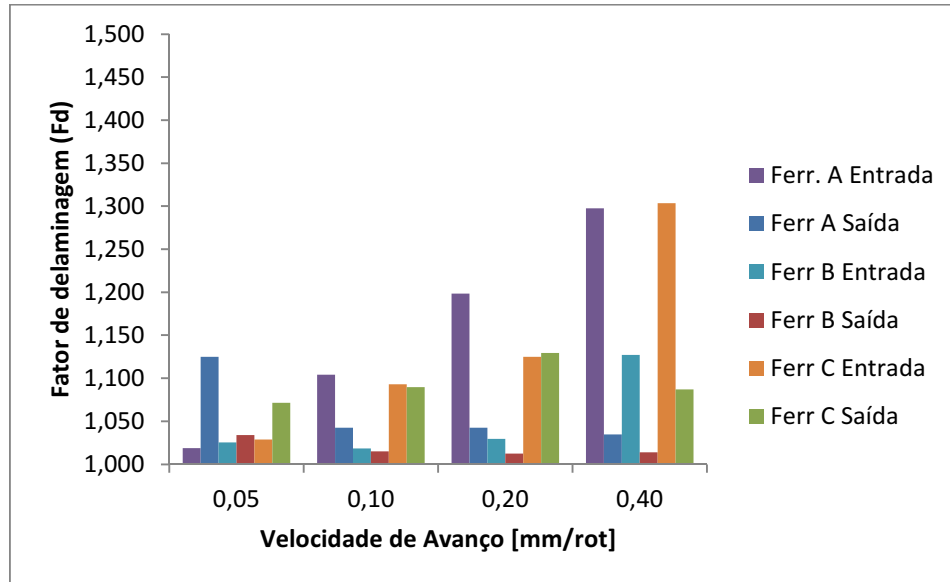
(a)



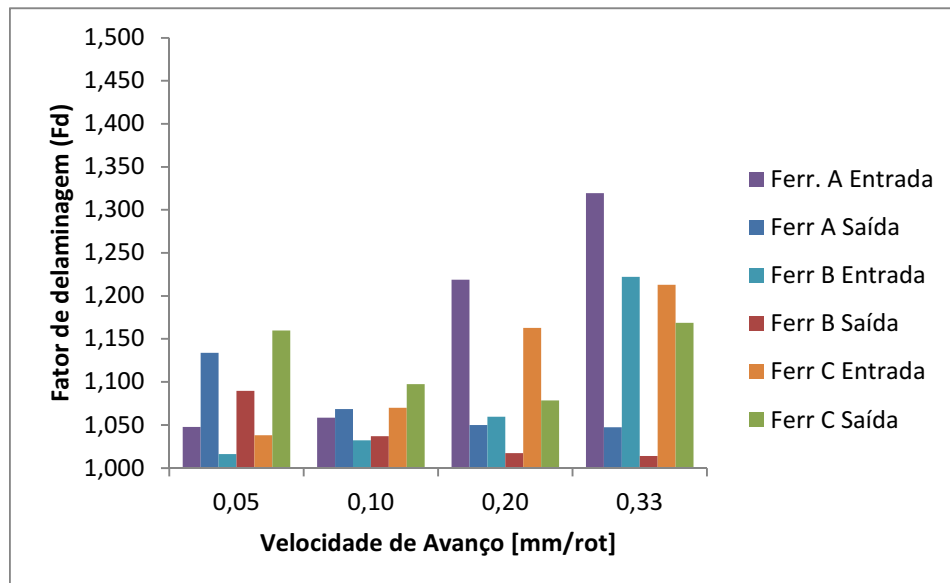
(b)

Figura 5.6: Comparação entre o fator de delaminação de entrada e o fator de delaminação de saída em função da velocidade de avanço:

a) Velocidade de rotação de 938rpm; b) Velocidade de rotação de 1875rpm;



(a)



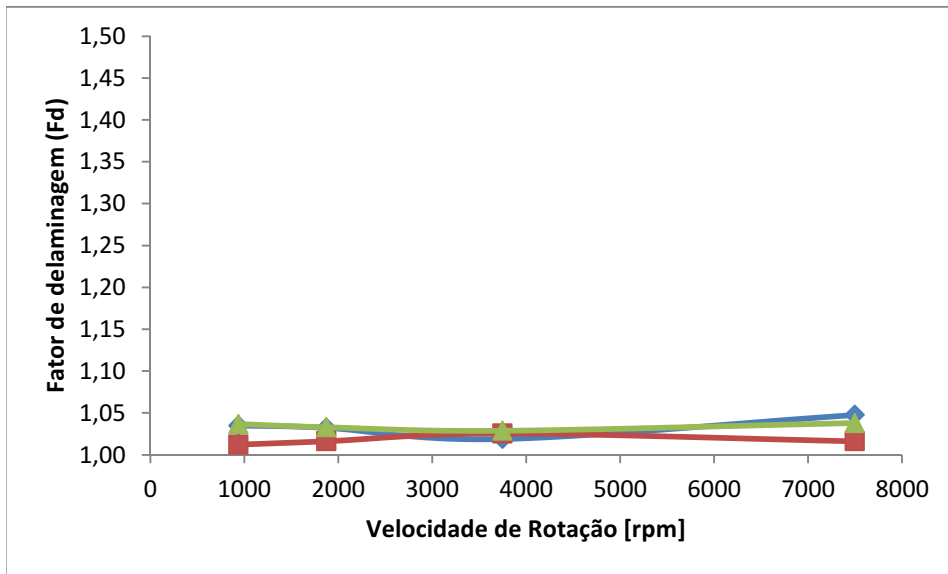
(b)

Figura 5.7: Comparação entre o o fator de delaminação de entrada e o fator de delaminação de saída em função da velocidade de avanço:

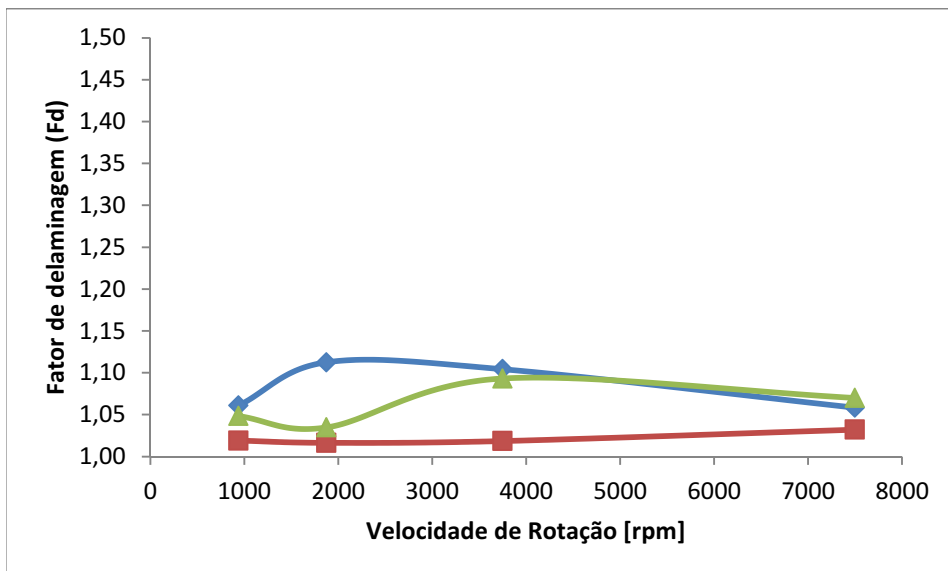
a) Velocidade de rotação de 3750rpm; b) Velocidade de rotação de 7500rpm.

### 5.1.2 Velocidade de rotação

Nas figuras 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 encontram-se os gráficos relativos ao fator de delaminação à entrada e à saída do furo em relação à  $V_{rot}$ .

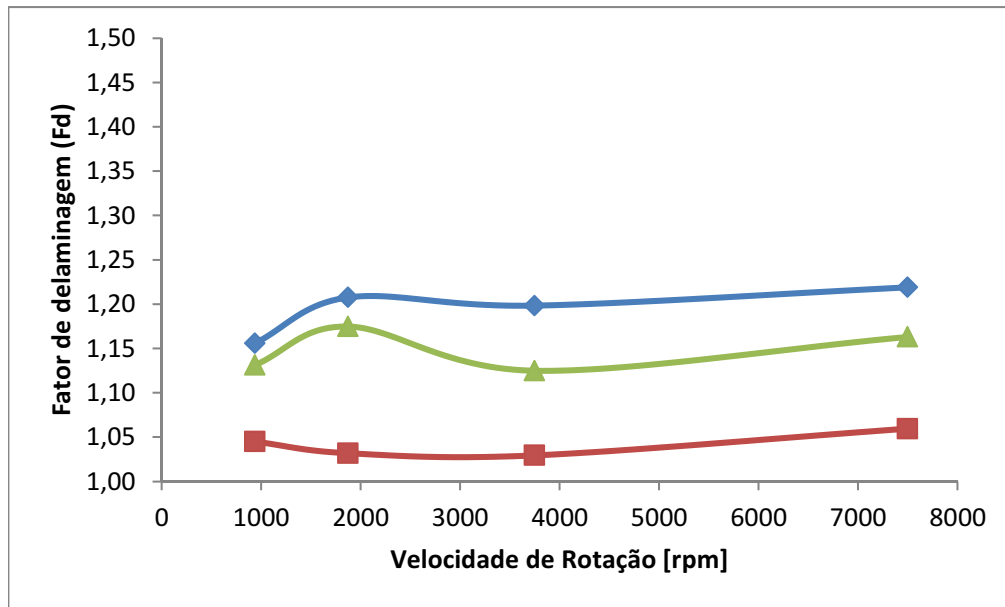


(a) ◆ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

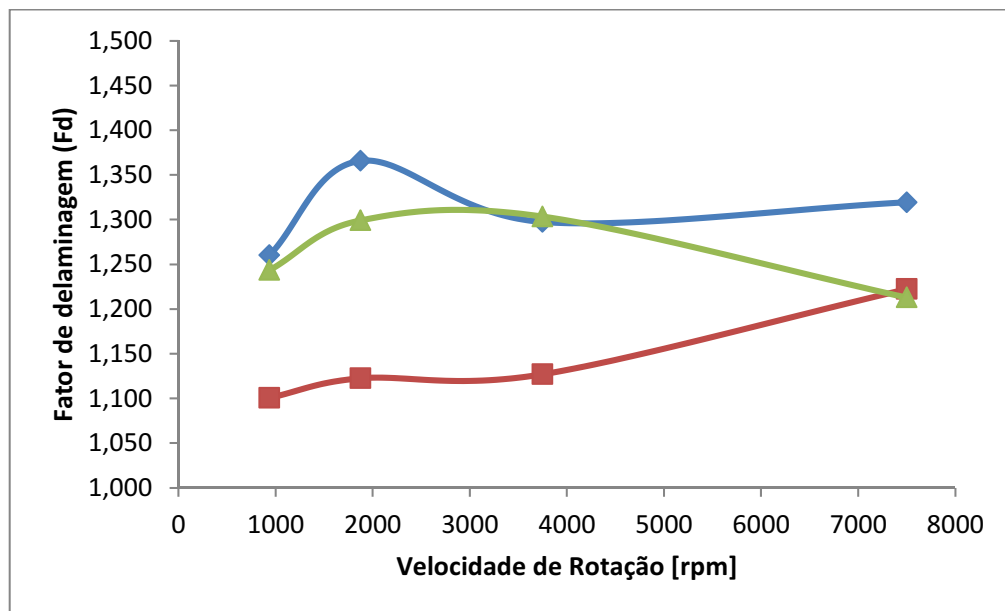


(b) ◆ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

Figura 5.8: Fator de delaminação de entrada em função da velocidade de rotação: a) Velocidade de avanço de 0,05mm/rot; b) Velocidade de avanço de 0,1mm/rot.

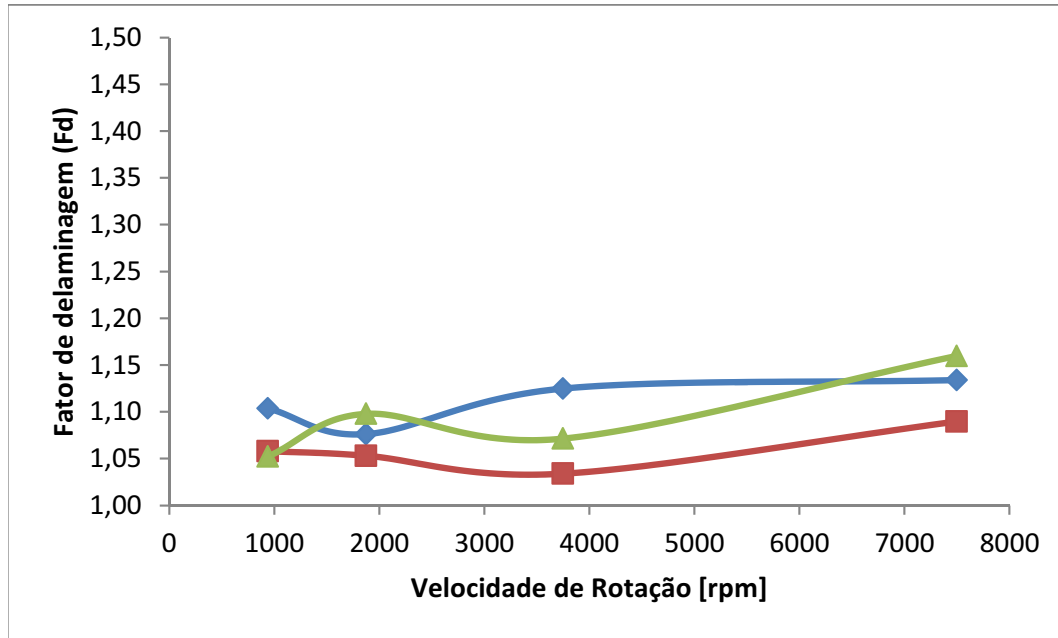


(a) ♦ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

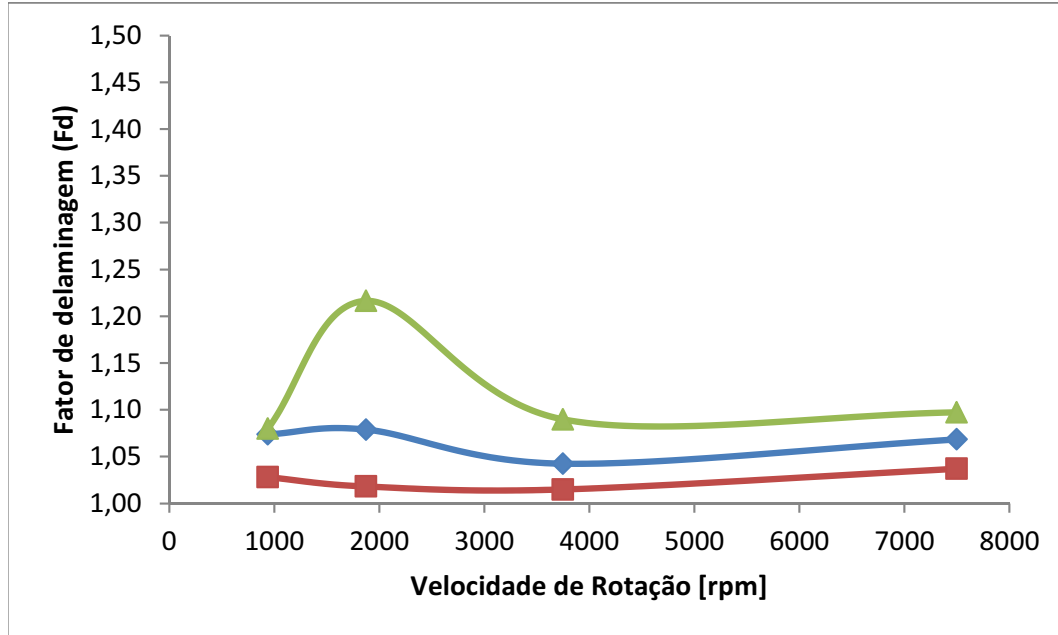


(b) ♦ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

Figura 5.9: Fator de delaminação de entrada em função da velocidade de rotação:  
a) Velocidade de avanço de 0,2mm/rot; b) Velocidade de avanço de 0,4mm/rot



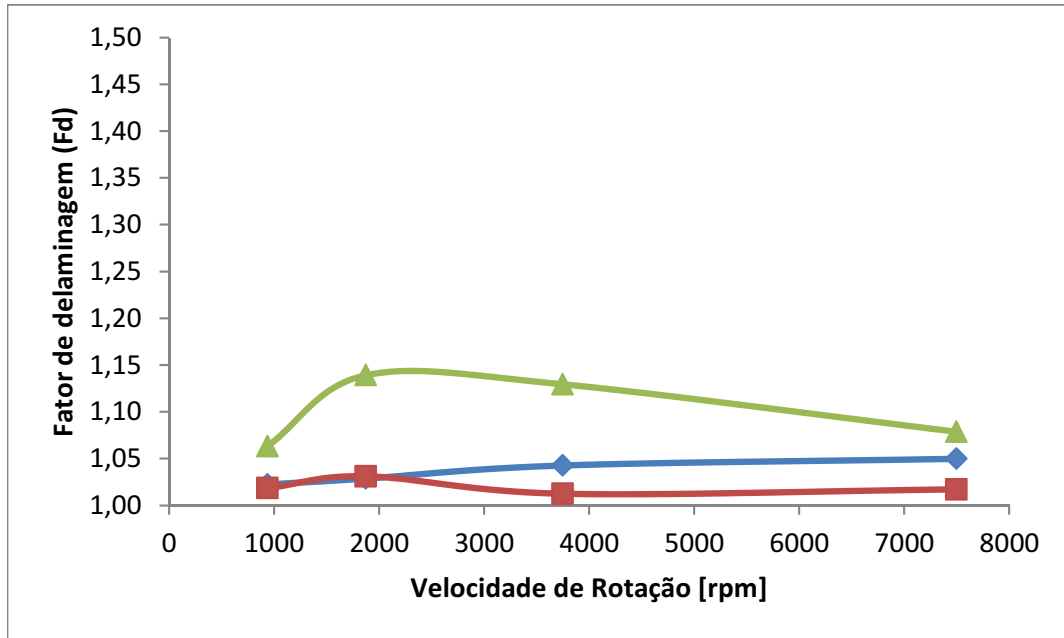
(a) ◆ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)



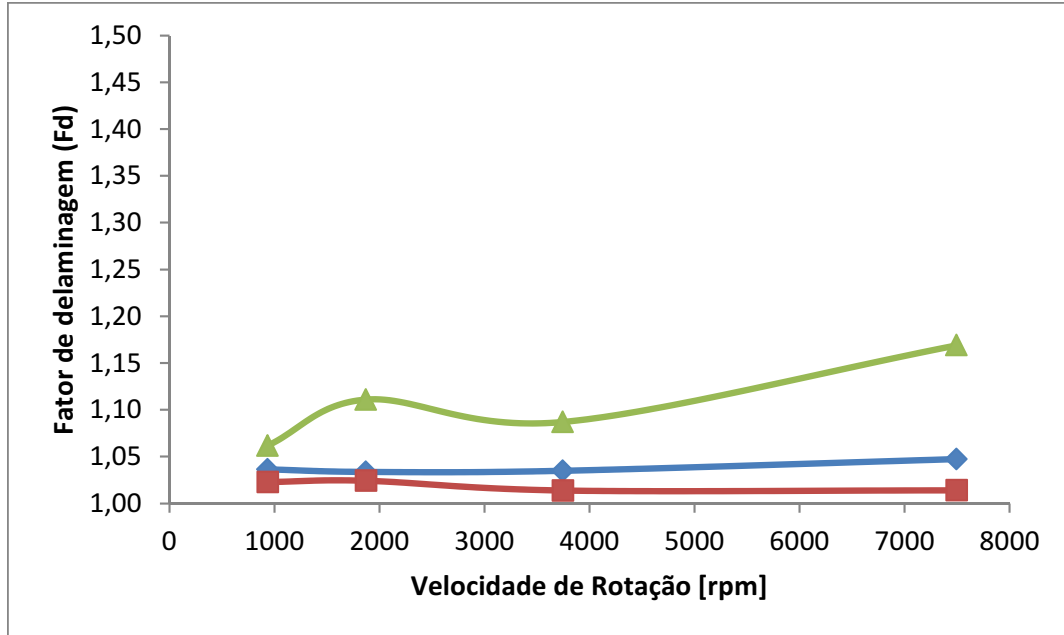
(b) ◆ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

Figura 5.10: Fator de delaminação de saída em função da velocidade de rotação:  
a) Velocidade de avanço de 0,05mm/rot; b) Velocidade de avanço de 0,1mm/rot;





(a) ♦ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)



(b) ♦ Ferr. A (“TiN”, 140°) ■ Ferr. B (“Diamond”, 120°) ▲ Ferr. C (conv, 140°)

Figura 5.11: Fator de delaminação de saída em função da velocidade de rotação: a) Velocidade de avanço de 0,2mm/rot; b) Velocidade de avanço de 0,4mm/rot.

De salientar que o estudo da  $V_{rot}$  é efetuado com os mesmos dados que compõem o estudo da  $V_a$ . Estes gráficos são apresentados, de modo a permitirem um melhor entendimento do efeito que a  $V_{rot}$  tem sobre a delaminação.

### Delaminação de entrada

Quanto à análise da delaminação de entrada, através da visualização dos gráficos presentes nas figuras 5.8 e 5.9, é possível verificar que de um modo geral, o fator de delaminação de entrada não varia, de forma significativa, com a variação da  $V_{rot}$ , especialmente quando a  $V_a$  utilizada é reduzida (0,05mm/rot), pois a variação do fator de delaminação é praticamente inexistente para as três ferramentas testadas. Estes resultados estão de acordo com as conclusões obtidas por *Gaitonde et al.*, [2008], *Shyha et al.*, [2009] e *Lazar and Xirouchakis*, [2011] que afirmam que a  $V_{rot}$  tem uma influência diminuta sobre a delaminação quando comparada com a  $V_a$ . Estão também de acordo com os resultados apresentados por *Davim et al.*, [2007], que para uma  $V_a$  de 0,3mm/rot apresenta uma delaminação constante ao longo de toda a gama de valores de  $V_{rot}$  testada.

De salientar que apesar do fator de delaminação variar pouco em função da  $V_{rot}$ , o desempenho das ferramentas diferencia-se com o aumento de  $V_a$  a que os testes foram efetuados. Ou seja, quanto maior é a  $V_a$ , maior é a diferença entre o desempenho das ferramentas, sendo que a ferramenta B (“*Diamond*”, 120°) apresentou sempre os melhores resultados.

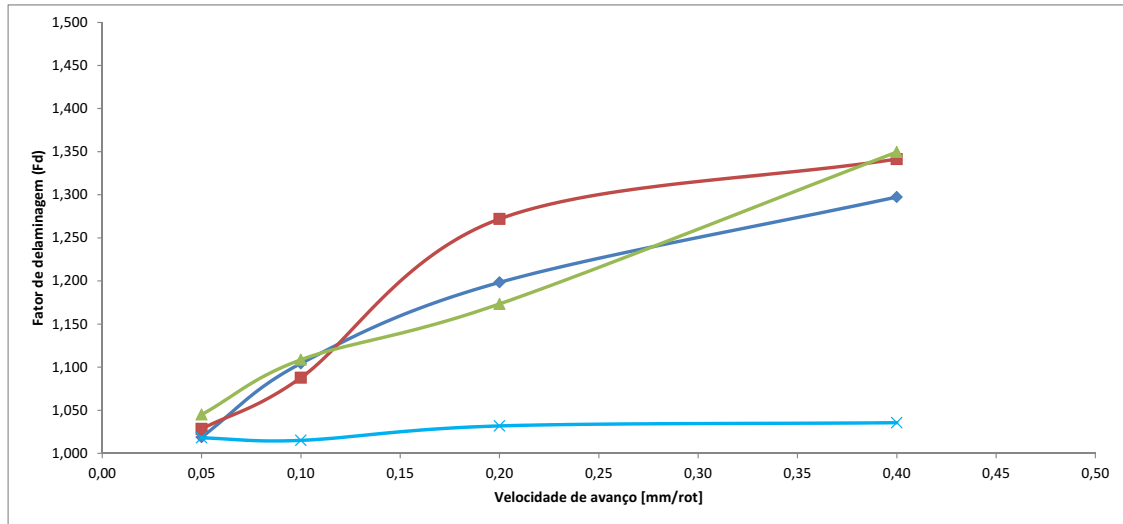
### Delaminação de saída

Recorrendo à análise das figuras 5.10 e 5.11 é possível verificar que, tal como na delaminação de entrada, o fator de delaminação de saída, varia de forma pouco significativa com a variação da velocidade de rotação. Apesar disso, e de forma congruente com os restantes resultados acima mencionados, a ferramenta B (“*Diamond*”, 120°) foi a que melhor desempenho apresentou ao longo de todos os testes.

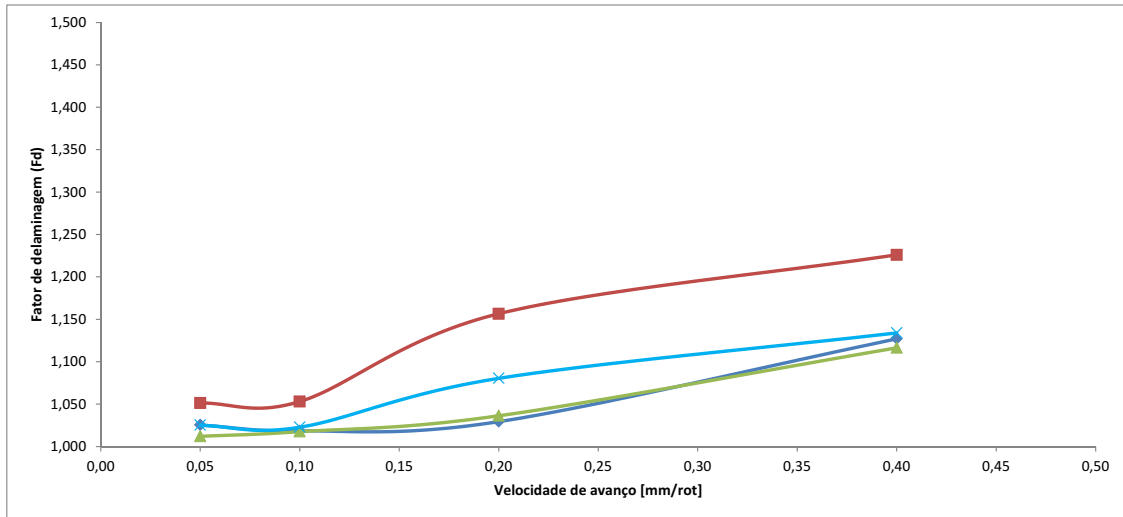
No gráfico presente na figura 5.10b) o segundo valor apresentado pela ferramenta C (convencional, 140°), foge bastante ao padrão estabelecido pelos restantes resultados. Este facto tem origem em defeitos localizados, presentes na superfície da placa, como referido anteriormente. Um dos furos em questão pode ser visto no anexo 7.4.

Para as gamas de velocidades testadas no estudo da delaminação de saída, a diferença de desempenho das ferramentas foi constante, o mesmo não se verificou para a delaminação de entrada. Isto deve-se à influência que a  $V_a$  tem na delaminação de entrada que não tem na delaminação de saída.

## 5.2 Técnicas de furação



(a) ◆ S/ técnica ■ "Sandwich" ▲ Pré-furo × Placas de sacrifício



(b) ◆ S/ técnica ■ "Sandwich" ▲ Pré-furo × Placas de sacrifício

Figura 5.12: Fator de delaminação de entrada em função da velocidade de avanço para as várias técnicas testadas: a) Ferramenta A ("TiN", 140°); b) Ferramenta B ("Diamond", 120°).

### Delaminagem de entrada

Relativamente à análise das técnicas de furação e recorrendo aos gráficos presentes na figura 5.12, verificou-se uma tendência geral para todas as técnicas testadas e para ambas as ferramentas. Esta tendência, é a mesma verificada nos testes de furação dita normal (ausência de técnica específica), ou seja, o fator de delaminagem de entrada aumenta com o aumento da  $V_a$ .

A técnica das placas de sacrifício com a ferramenta A (“*TiN*”,  $140^\circ$ ), apresentou bons resultados, pois o fator de delaminagem de entrada é bastante diminuto, mesmo para valores elevados da  $V_a$  e para além disso, os furos apresentam-se praticamente isentos de delaminagem.

No caso da ferramenta B (“*Diamond*”,  $120^\circ$ ), nenhuma das técnicas foi capaz de oferecer uma melhoria significativa em relação à furação dita normal (ausência de técnica específica).

A disparidade entre os resultados das ferramentas sugere que, a diferença entre os seus ângulos de ponta ( $\sigma_{Ferr.A} = 140^\circ$ ;  $\sigma_{Ferr.B} = 120^\circ$ ), afeta o desempenho das mesmas quando submetidas às técnicas testadas, especialmente no caso da técnica das placas de sacrifício.

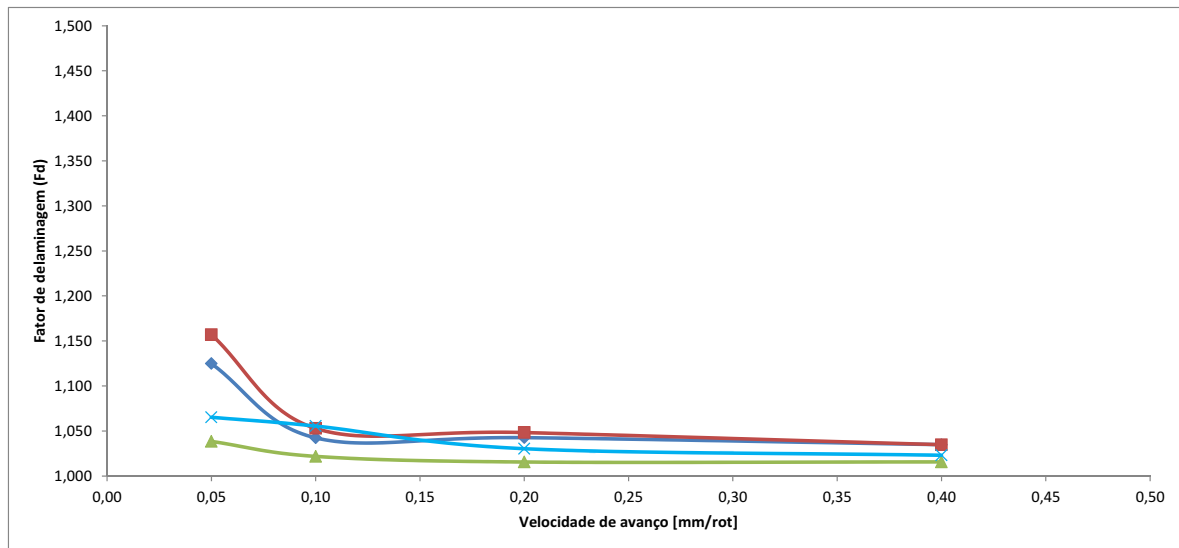
No caso da técnica de “*sandwich*”, o fator de delaminagem apresentado foi sempre superior a qualquer outro. Este resultado encontra-se próximo do esperado, pois o facto de existir um corpo rígido estranho entre as placas, contribui para o aumento do fator de delaminagem de entrada no compósito.

Consideram-se estes resultados obtidos expectáveis pois, de algum modo, estão em sintonia com os resultados obtidos pelos investigadores *Piquet et al.*, [2000]; *Won and Dharan*, [2002b]; *Davim and Reis* [2003b]; *Tsao and Hocheng*, [2003]; *Capello*, [2004]; *Tsao and Hocheng*, [2005c].

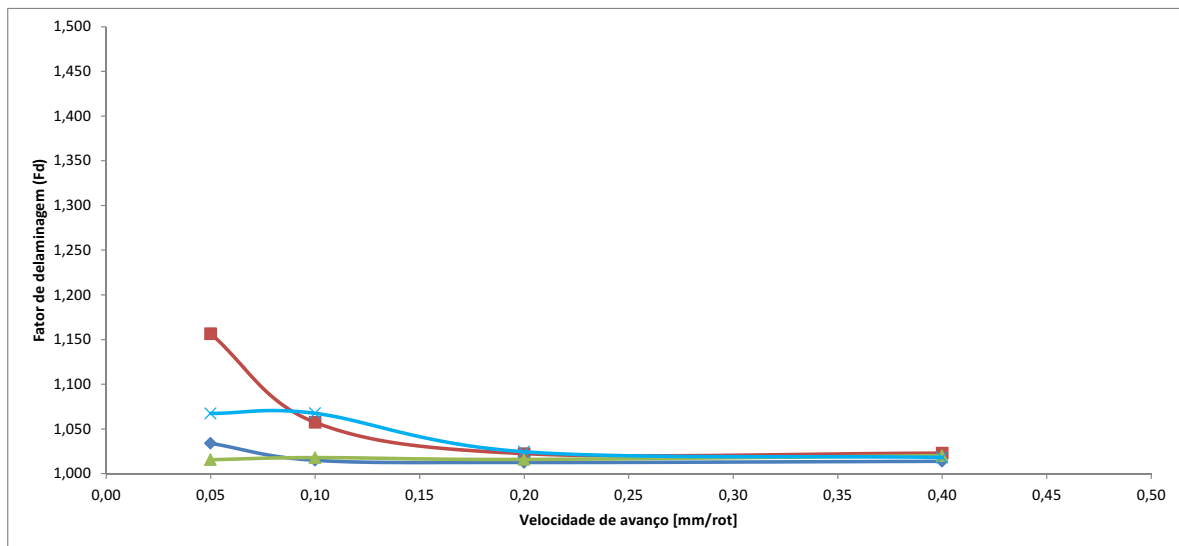
No caso da técnica de pré-furo, os resultados obtidos ficaram um pouco aquém do esperado, pois o fator de delaminagem de entrada, no caso da ferramenta A (“*TiN*”,  $140^\circ$ ), é em muitos casos, superior ao da furação normal (ausência de técnica específica). Quando o expectável seria uma diminuição clara do fator de delaminagem de entrada ao recorrer à técnica de pré-furo, o que também não se verificou, nos ensaios relativos à ferramenta B (“*Diamond*”,  $120^\circ$ ), visto o seu desempenho ter sido idêntico, independentemente da utilização ou não da técnica de pré-furo. Esta diminuição foi registada por *Won and Dharan* [2002a], que concluíram que a presença de um pré-furo diminui a força de avanço máxima atingida durante o processo de furação, pois o contacto entre a ponta da ferramenta e o compósito nunca acontece. O motivo pelo qual a técnica ficou aquém do esperado pode ser justificado pelas conclusões de *Tsao and Hocheng* [2004], que concluíram que a eficiência

## 5.2. TÉCNICAS DE FURAÇÃO

da técnica de pré-furo pode estar interligada com o diâmetro do pré-furo realizado.



(a) ◆ S/ técnica ■ "Sandwich" ▲ Pré-furo × Placas de sacrifício



(b) ◆ S/ técnica ■ "Sandwich" ▲ Pré-furo × Placas de sacrifício

Figura 5.13: Fator de delaminação de saída em função da velocidade de avanço para as várias técnicas testadas: a) Ferramenta A ("TiN", 140°); b) Ferramenta B ("Diamond", 120°).

### Delaminagem de saída

Relativamente à análise das técnicas de furação e recorrendo aos gráficos presentes na figura 5.13, verificou-se a mesma tendência para ambas as ferramentas em todas as técnicas testadas, não existindo uma variação significativa do fator de delaminagem de saída em função da variação da  $V_a$ , para as gamas de velocidades testadas.

No caso da ferramenta A (“TiN”, 140°), a técnica que apresentou melhorias mais significativas foi a técnica do pré-furo, pois apresentou valores muito baixos para o fator de delaminagem de saída, em toda a gama de valores da  $V_a$ .

No caso da ferramenta B (“Diamond”, 120°) não se verificaram melhorias entre qualquer uma das técnicas testadas e a furação dita normal (ausência de técnica específica), com exceção da técnica de pré-furo à  $V_a$  mais reduzida (0,05mm/rot).

Considera-se que a técnica de “sandwich” apresentou o pior desempenho de todas. Este resultado vem de encontro ao esperado, pois o facto de existir um corpo rígido estranho entre as placas, contribui para o aumento do fator de delaminagem de saída.

É de salientar que para ambas as ferramentas, a técnica de pré-furo apresenta melhor desempenho, obtendo furos praticamente isentos de delaminagem quando a  $V_a$  é reduzida (0,05mm/rot).

O fator de delaminagem apresentado pelas diversas técnicas de furação, segue a tendência geral verificada nos testes sem qualquer técnica de furação específica, ou seja, o fator de delaminagem de saída, variou de forma pouco significativa com o aumento da  $V_a$ . Contudo, para  $V_a$  reduzidas (0,05mm/rot), foi notória uma diferença mais acentuada no desempenho das diversas técnicas.

Na grande maioria dos casos, a ferramenta B (“Diamond”, 120°) apresentou melhores resultados que a ferramenta A (“TiN”, 140°), à exceção da técnica das placas de sacrifício. Este facto leva a crer que, o facto do ângulo de ponta ( $\sigma$ ) da ferramenta ser maior, contribuiu para melhores resultados na técnica das placas de sacrifício.

## 5.3 Estudo de temperatura

O estudo da temperatura de início de furação é apenas relativo à superfície de entrada do compósito, devido às limitações do equipamento utilizado, deste modo, os valores nele apresentados referem-se às temperaturas medidas na superfície de entrada do compósito. Assim como, os valores dos fatores de delaminagem apresentados são apenas de entrada.

Através da análise da figura 5.14 foi possível verificar que, para ambas as ferramen-

tas testadas, a temperatura de início de furação diminuiu com o aumento da  $V_a$ . Esta tendência tem origem na diminuição do tempo de corte a que a ferramenta está sujeita para atingir a mesma profundidade de furação. Como resultado deste fenómeno, surgem os resultados presentes na figura 5.15, que sugerem que o fator de delaminagem de entrada diminuiu com o aumento da temperatura de início de furação, para ambas as ferramentas testadas.

Ainda relativamente à figura 5.14 foi possível verificar que a ferramenta B (“*Diamond*”, 120°) apresentou uma variação de temperatura de início de furação muito mais acentuada que a ferramenta A (“*TiN*”, 140°).

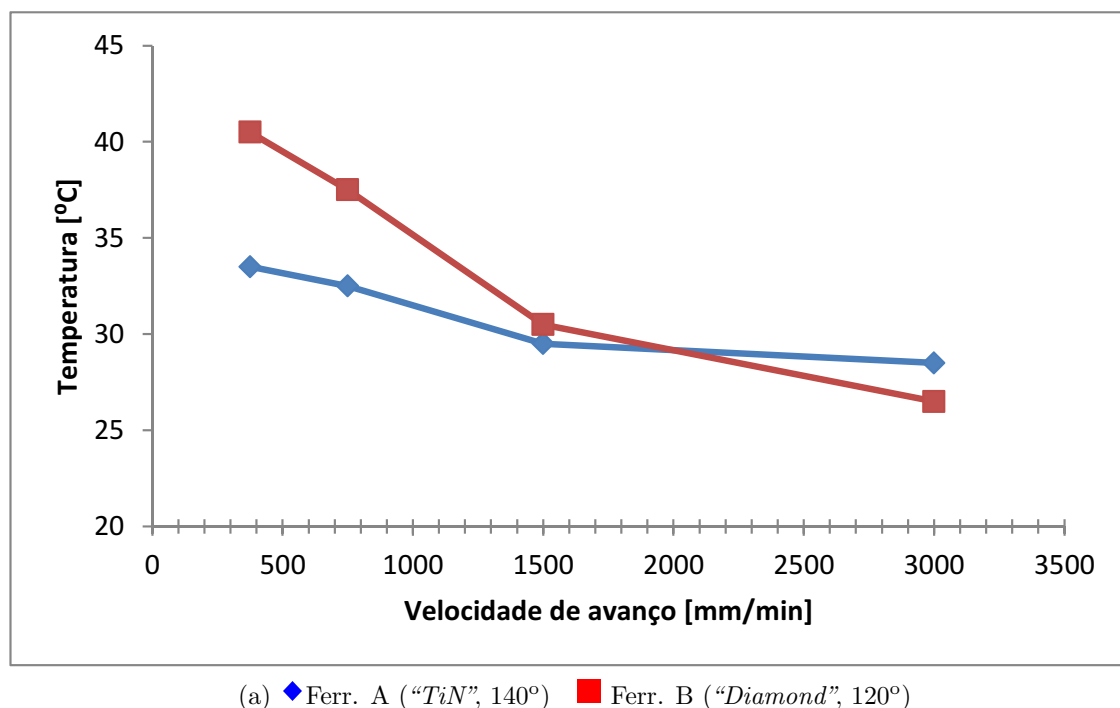
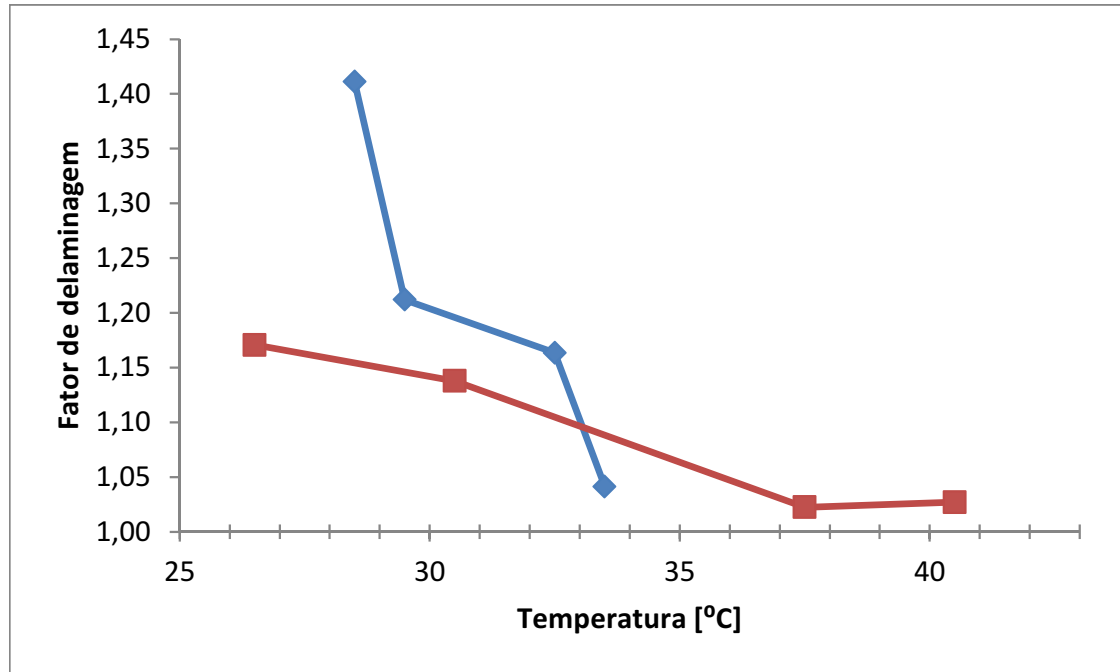


Figura 5.14: Resultados da temperatura na entrada da ferramenta em função da velocidade de avanço a uma velocidade de rotação de 3750rpm.



(a) ♦ Ferr. A ("TiN", 140°) ■ Ferr. B ("Diamond", 120°)

Figura 5.15: Resultados do fator de delaminagem de entrada em função da temperatura de entrada da ferramenta a uma velocidade de rotação de 3750rpm.

Na figura 5.16 estão representados os resultados do fator de delaminagem em função da  $V_a$ , apresentado pelas ferramentas A ("TiN", 140°) e B ("Diamond", 120°), com e sem patamares de arrefecimento. Foi possível verificar, que ambas as ferramentas apresentaram um melhor desempenho para ciclos contínuos de furação.

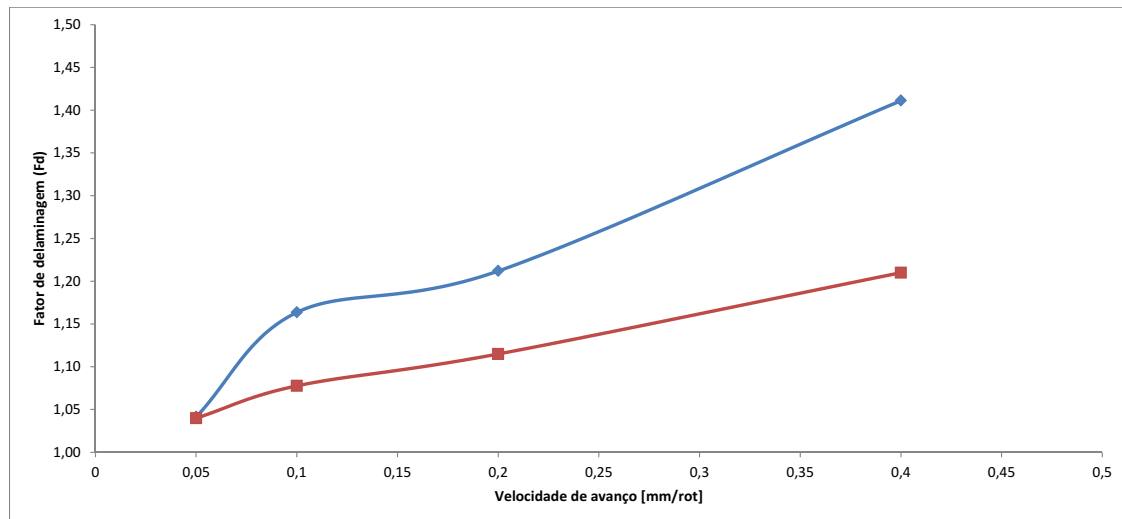
A ferramenta A ("TiN", 140°) foi a que apresentou maior disparidade entre os valores referentes aos dois ciclos. Estes resultados sugerem uma influência da temperatura de entrada da ferramenta sobre o fenómeno da delaminagem.

No caso da ferramenta B ("Diamond", 120°), a diferença entre os ciclos de furação é menos acentuada, o que pode estar relacionado com o facto do revestimento superficial lhe conferir maior coeficiente de transferência de calor por convecção, permitindo assim a diminuição da sua temperatura de forma mais rápida entre furos, mesmo sem patamares de arrefecimento. De qualquer modo, apesar de menos acentuadas, existem melhorias significativas observadas entre os ciclos de furação. Estes resultados podem ser considerados concordantes com as conclusões obtidas por Zhang *et al.*, [2013] que considera que ferramentas com revestimento "diamantado" melhoram o seu desempenho. A suportar esta

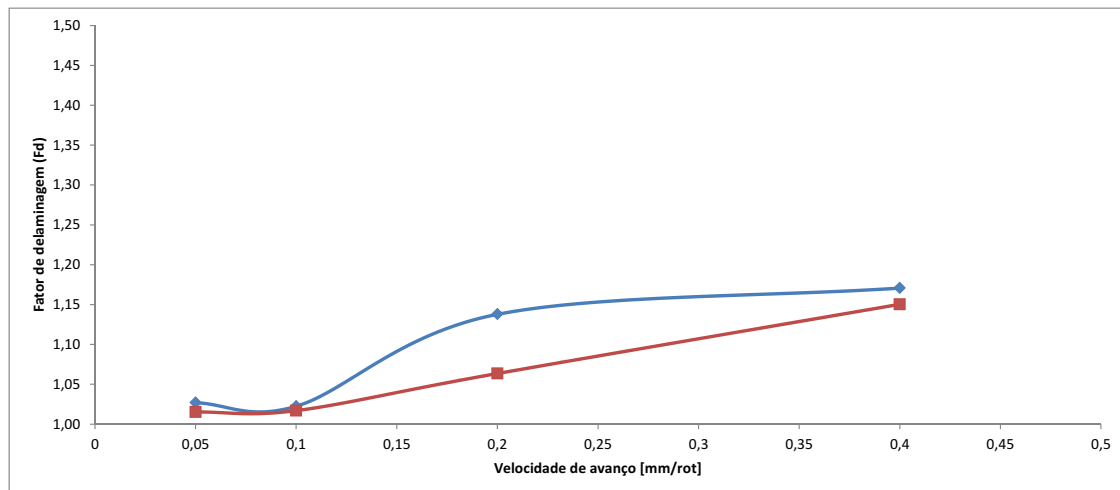


### 5.3. ESTUDO DE TEMPERATURA

conclusão, está ainda o facto de que, a uma  $V_a$  elevada (0,4mm/rot), a temperatura de início de furação é superior para a ferramenta A (“*TiN*”) como se pode ver na figura 5.14.



(a) ◆ C/ arrefecimento ■ S/ arrefecimento



(b) ◆ C/ arrefecimento ■ S/ arrefecimento

Figura 5.16: Comparação entre ciclos de furação contínuos e ciclos de furação com patamares de arrefecimento: a) Ferramenta A (“*TiN*”,  $140^\circ$ ); b) Ferramenta B (“*Diamond*”,  $120^\circ$ ).



## Capítulo 6

### Conclusões

Considera-se que, de todas as ferramentas testadas, aquela que apresenta o melhor desempenho em termos de delaminação na peça, é a ferramenta B (“*Diamond*”, 120°), pois apresentou em quase todos testes, valores de fator de delaminação inferiores aos apresentados pelas ferramentas A (“*TiN*”, 140°) e C (convencional, 140°).

A ferramenta A (“*TiN*”, 140°) apresenta valores de delaminação de entrada sempre superiores aos valores apresentados pela ferramenta B (“*Diamond*”, 120°), o que se poderá dever à diferença nos seus ângulos de ponta ( $\sigma$ ).

A ferramenta C (convencional, 140°) apresentou o pior desempenho das três ferramentas testadas, visto que em quase todos testes, apresentou valores de fator de delaminação superiores aos apresentados pelas ferramentas A (“*TiN*”, 140°) e B (“*Diamond*”, 120°).

O parâmetro processual que se revelou mais influente sobre a delaminação de entrada foi a velocidade de avanço  $V_a$ , esta delaminação teve uma tendência clara a aumentar com o aumento da  $V_a$ . A variação da delaminação de entrada apresentada pelas três ferramentas testadas foi muito reduzida quando a furação foi efetuada a uma  $V_a$  baixa (0,05mm/rot), o que se deve à  $F_a$  reduzida que se verifica a essa velocidade.

A delaminação de saída foi superior à delaminação de entrada quando a  $V_a$  é baixa (0,05mm/rot), no entanto quando a  $V_a$  é elevada a delaminação na saída foi inferior à delaminação de entrada. Quando se aumentou a  $V_a$  a delaminação de entrada aumentou consideravelmente, o que não aconteceu com a delaminação de saída.

Verificou-se que as ferramentas específicas para a furação de compósitos utilizadas neste trabalho (ferramenta A e B), se encontram mais aptas, para obter furos praticamente isentos de delaminação à saída do compósito do que à entrada.

Para as gamas de velocidades testadas, a velocidade de rotação ( $V_{rot}$ ) não parece ter

tido influência significativa no fenómeno de delaminação.

De todas as técnicas testadas, a que originou melhores resultados para a delaminação de entrada, foi a técnica das placas de sacrifício e a que originou uma melhoria mais significativa para a delaminação de saída, foi a técnica de pré-furo com a ferramenta A (“TiN”, 140°) a uma velocidade de avanço  $V_a$  reduzida.

Os resultados obtidos no estudo da temperatura sugerem que, para as gamas de velocidades testadas, a delaminação de entrada diminuiu com o aumento da temperatura de início de furação. Relativamente à comparação feita entre ciclos de furação contínuos e os ciclos de furação com patamares de arrefecimento entre furos, existe uma conclusão clara a ser retirada: ambas as ferramentas apresentaram melhor desempenho em ciclos de furação contínuos. Ou seja, quando a ferramenta iniciou a furação mais quente, produziu furos com menor fator de delaminação de entrada. Considera-se portanto, que a temperatura a que a ferramenta inicia o processo de furação poderá ser um fator preponderante na formação de delaminação de entrada.

Recorrendo a um estudo mais aprofundado do tema será possível retirar conclusões mais claras sobre esta relação e assim diminuir ainda mais a delaminação de entrada verificada na furação de compósitos laminados de CFRP’s.

Em geral, os resultados obtidos mostram que a utilização de parâmetros de corte ( $V_a$  e  $V_{rot}$ ) apropriados, em conjunto com uma técnica de furação adequada e o aquecimento prévio da ferramenta de corte, podem conduzir a uma menor delaminação de entrada na placa de compósito.

# Bibliografia

- [Abrão et al, 2007] ABRÃO, A. M., FARIA, P. E., CAMPOS RUBIO, J. C., REIS, P. & DAVIM, J. P. 2007. Drilling of fiber reinforced plastics: A review. *Journal of Materials Processing Technology*, 186, 1 - 7.
- [Adams, 1996] ADAMS, L. 1996. Efficient method for unsupported drilling of composites. *The 41st International SAMPE Symposium*, 1496 - 1502.
- [Capello, 2004] CAPELLO, E. 2004. Workpiece damping and its effect on delamination damage in drilling thin composite laminates. *Journal of Materials Processing Technology*, 148(2), 186 - 195.
- [Chamber and Bishop, 1995] CHAMBERS, A. & BISHOP, G. 1995. The drilling of carbon fibre polymer matrix composites. *ICCM*, 565 - 72.
- [Chen, 1997] CHEN, W. C. 1997. Some experimental investigations in the drilling of carbon fiber-reinforced plastic (CFRP) composite laminates,. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 37(8), 1097 - 1108.
- [Davim and Reis, 2003a] DAVIM, J. P. & REIS, P. 2003a. Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave - experimental and statistical study. *Materials & Design*, 24(5), 315 - 324.
- [Davim and Reis, 2003b] DAVIM, J. P. & REIS, P. 2003b. Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics

- (CFRP) using design experiments. *Composite Structures*, 59(4), 481 - 487.
- [Davim et al, 2004a] DAVIM, J. P., REIS, P. & ANTONIO, C. C. 2004a. Drilling fiber reinforced plastics (FRPs) manufactured by hand lay-up: influence of matrix (Viapal VUP 9731 and ATLAC 382-05). *Journal of Materials Processing Technology*, 155 - 156, 1828 - 1833.
- [Davim et al, 2007] DAVIM, J. P., RUBIO, J. C. & ABRAO, A. M. 2007. A novel approach based on digital image analysis to evaluate the delamination factor after drilling composite laminates. *COMPOSITES SCIENCE AND TECHNOLOGY*, 67, 1939 - 1945.
- [Durão et al, 2010] DURÃO, L.M.P., GONÇALVES, D.J.S., TAVARES, J.M.R.S., ALBUQUERQUE, V.H.C.D., MARQUES, A.T. Drilling process of composite laminates – a tool based analysis. In: 14th European conference on composite materials (ECCM14). Budapest; 2010. p. 1– 10
- [Durão, 2013] DURÃO, L. M. 2013. Avaliação do dano na furação de placas Carbono/Epóxico. *Revista da Ordem dos Engenheiros Mecânicos - Região Norte*, 20 - 23.
- [Edwards, 1993] EDWARDS, R. 1993. *Cutting Tools*. The Institute of Materials.
- [El-Sonbaty et al, 2004] EL-SONBATY, I., KHASHABA, U. A. & MACHALY, T. 2004. Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites. *Composite Structures*, 63(3-4), 329 - 338.
- [Enemuoh et al, 2001] ENEMUOH, E. U., EL-GIZAWY, A. S. & OKAFOR, A. C. 2001. An approach for development of damage-free drilling of carbon fiber reinforced thermosets. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41(12), 1795 - 1814.

- [Everstine and Rogers, 1971] EVERSTINE, G. C. & ROGERS, T. G. 1971. A theory of machining of reinforced materials. *Journal of Composite Materials*, 5, 94 - 106.
- [Gaitonde et al, 2008] GAITONDE, V. N., KARNIK, S. R., CAMPOS RUBIO, J., ESTEVES CORREIA, A. & ABRÃO, A. M., PAULO DAVIM, J. 2008. Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites. *Elsevier*, 431-438
- [Griffith, 1920] GRIFFITH, A. A. 1920. The phenomenon of rupture and flow in solids, *philosophical transactions of the royal society*. 163-198.
- [Grilo et al, 2012] GRILO, T. J., PAULO, R. M. F., SILVA, C. R. M. & DAVIM, J. P. 2012. Experimental delamination analyses of CFRPs using different drill geometries. *ELSEVIER*. 1344–1350.
- [Hocheng and Dharan, 1990] HOCHENG, H. & DHARAN, C. K. H. 1990. Delamination during drilling in composite laminates. *Journal of Engineering for Industry-Transactions of the Asme*, 112(3), 236 - 239.
- [Hocheng and Puw, 1992] HOCHENG, H. & PUW, H. Y. 1992. On drilling characteristics of fiber-reinforced thermoset and thermoplastics. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 32(4), 583 - 592.
- [Hocheng and Puw, 1993] HOCHENG, H. & PUW, H. Y. 1993. Machinability of fiber-reinforced thermoplastics in drilling. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme*, 115, 146 - 149.
- [Hocheng and Tsao, 2003] HOCHENG, H. & TSAO, C. C. 2003. Comprehensive analysis of delamination in drilling of composite materials with various drill bits. *Journal of Materials Processing Technology*, 140, 335 - 339.

- [Hocheng and Tsao, 2006] HOCHENG, H. & TSAO, C. C. 2006. Effects of special drill bits on drilling-induced delamination of composite materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 46, 12 - 13.
- [Isibilir and Ghassemieh, 2013] ISBILIR, O. & GHASSEMIEH, E. 2013. Numerical Investigation of The Effects of Drill Geometry on Drilling Induced Delamination of Carbon Fiber Reinforced Composites. Elsevier.
- [Jahanmir et al, 1999] JAHANMIR, S., RAMULU, M. & KOSHY, P. 1999. Machining of Ceramics and Composites. Marcel Dekker, 209 - 295.
- [Jain and Yang, 1993] JAIN, S. & YANG, D. C. H. 1993. Effects of feedrate and chisel edge on delamination in composites drilling. *Journal of Engineering for Industry-Transactions of the ASME*, 115(4), 398 - 405.
- [Jain and Yang, 1994] JAIN, S. & YANG, D. C. H. 1994. Delamination-free drilling of composite laminates. *Journal of Engineering for Industry - Transactions of the ASME*, 116(4), 475 - 481.
- [Karnik et al, 2008] KARNIK, S. R., GAITONDE, V. N., CAMPOS RUBIO, J., ESTEVES CORREIA, A., ABRÃO, A. M. & DAVIM, J. P. 2008. Delamination analysis in high speed drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using artificial neural network model. *Materials and Design*, 29, 1768 - 1776
- [Khashaba, 2004] KHASHABA, U. A. 2004. Delamination in drilling GFR-thermoset composites. *Composite Structures*, 63(3-4), 313 - 327.
- [Koenig and Grass, 1989] KOENIG, W. & GRASS, P. 1989. Quality definition and assessment in drilling of fibre reinforced thermosets. *Ann CIRP*, 38, 119 - 124



- [Koenig et al, 1985] KOENIG, W., WULF, C., GRASS, P. & WILLERSCHIED, H. 1985. Machining of fiber reinforced plastics. *Ann CIRP*, 537 - 548.
- [Komanduri, 1993] KOMANDURI, R. 1993. Machining fiber-reinforced composites. *Mechanical Engineering*, 115(4), 58 - 64.
- [Krishnaraj et al, 2012] KRISHNARAJ, V., PRABUKARTHI, A., RAMANATHAN, A., ELANGHOVAN, N., KUMAR, S. M., ZITOUNE, R. & DAVIM, J. P. 2012. Optimization of machining parameters at high speed drilling of carbon fiber reinforced plastic (CFRP) laminates. *ELSEVIER, Composites:Part B* 43, 1791 - 1799.
- [Langela et al, 2005] LANGELLA, A., NELE, L. & MAIO, A. 2005. A torque and thrust prediction model for drilling of composite materials. *Composites Part a-Applied Science and Manufacturing*, 36(1), 83 - 93.
- [Lazar and Xirouchakis, 2011] LAZAR, M. B. & XIROUCHAKIS, P. 2011. Experimental analysis of drilling fiber reinforced composites. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 51, 937 - 946.
- [Lin and Chen, 1996] LIN, S. C. & CHEN, I. K. 1996. Drilling carbon fiber-reinforced composite material at high speed. *Wear*, 194(1-2), 156 - 162.
- [Malhotra, 1990] MALHOTRA, S. K. 1990. Some Studies on drilling of fibrous composites. *Journal of Materials Processing Technology*, 24, 291 - 300.
- [Mathew et al, 1999b] MATHEW, J., RAMAKRISHNAN, N. & NAIK, N. K. 1999. Trepanning on unidirectional composites: delamination studies. *Composites Part a - Applied Science and Manufacturing*, 30(8), 951 - 959.
- [Mehta et al, 1992] MEHTA, M., REINHART, T. J. & SONI, A. H. 1992. Effect of fastener hole drilling anomalies on structural

- integrity of PMR-15/Gr composite laminates, the Machining Composite Materials Symposium. ASM Materials Week, 113 - 126.
- [Miller, 1987] MILLER, J.A. 1987. Drilling graphite/epoxy at Lockheed. Am Mach Autom Manufact.
- [Mohan et al, 2005] MOHAN, N. S., RAMACHANDRA, A. & KULKARNI, S. M. 2005. Machining of fiber-reinforced thermoplastics: influence of feed and drill size on thrust force and torque during drilling. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 24(12), 1247 - 1257.
- [Moura et al, 2011] MOURA, M. F. S.F., MORAIS, A. B. & MAGALHÃES, A. G. 2011. Materiais Compósitos - Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico.
- [Nobe et al, 1998] NOBE, H., AOYAMA, E., INOUE, H., HIROGAKI, T., KITAHARA, Y., KATAYAMA, T., GUNJIMA, M., OGAWA, K. & OKUNO, Y. 1998. Study on cause of internal damage of drilled GFRP (in case of small diameter drilling of plain woven cloth),. Polymer Blends and Polymer Composites, 137, 123 - 130.
- [Park et al, 1995] PARK, K. Y., CHOI, J. H. & LEE, D. G. 1995. Delamination-free and high-efficiency drilling of carbon fiber-reinforced plastics. Journal of Composite Materials, 29(15), 1988 - 2002.
- [Person et al, 1997] PERSSON, E., ERIKSSON, I. & HAMMERSBERG, P. 1997. Propagation of hole machining defects in pin-loaded composite laminates. Journal of Composite Materials, 31(4), 383 - 408.
- [Piquet et al, 2000] PIQUET, R., FERRET, B., LACHAUD, F. & SWIDER, P. 2000. Experimental analysis of drilling damage in thin carbon/epoxy plate using special drills.

- Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, 31(10), 1107 - 1115
- [Ramulu et al, 2001] RAMULU, M., BRANSON, T. & KIM, D. 2001. A study on the drilling of composite and titanium stacks. Composite Structures, 54(1), 67 - 77.
- [Reis, 2005] REIS, P. E. V. 2005. Furação de Materiais Compósitos de Matriz Polimérica. Mestrado, Universidade de Aveiro.
- [Sakuma et al, 1984] SAKUMA, K., YOKOO, Y. & SETO, M. 1984. Study on Drilling of reinforced-plastics (GFRP and CFRP) - relation between tool material and wear behavior. Bulletin of the Jsme-Japan Society of Mechanical Engineers, 27(228), 1237 - 1244.
- [Sandvik Portugal a] Sandvik Portugal. <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=R846-0500-30-A1A%201220> Acedido em 25/02/2014.
- [Sandvik Portugal b] Sandvik Portugal. <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=856.1-0500-05-A0%20N20C> Acedido em 25/02/2014.
- [Sandvik Portugal c] Sandvik Portugal. <http://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/pages/productdetails.aspx?c=R415.5-0500-30-AC0 1010> Acedido em 25/02/2014.
- [Shyha et al, 2009] SHYHA, I. S., ASPINWALL, D. K., SOO, S. L. & BRADLEY, S. 2009. Drill geometry and operating effects when cutting small diameter holes in CFRP. Elsevier, 1008-1014.
- [Shyha et al, 2010] SHYHA, I., SOO, S. L., ASPINWALL, D. & BRADLEY, S. 2010. Effect of laminate configuration and feed rate on cutting performance when drilling holes in carbon fiber reinforced plastic composites. Journal of Materials Processing Technology, 210, 1023 - 1034.

- [Singh et al, 2005a] SINGH, I. & BHATNAGAR, N. 2005a. Drilling of uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composite laminates. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [Singh et al, 2005b] SINGH, I. & BHATNAGAR, N. 2005b. Drilling-induced damage in uni-directional glass fiber reinforced plastic (UD-GFRP) composite laminates. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*.
- [Steve and Albert, 1997] STEVE, F. K. & ALBERT, F. C. 1997. *Technology of Machine Tools*, Fifth Edition.
- [Stone and Kkrishnamurthy, 1996] STONE, R. & KRISHNAMURTHY, K. 1996. A neural network thrust force controller to minimize delamination during drilling of graphite-epoxy laminates. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 36(9), 985 - 1003.
- [Tagliaferri et al, 2005] TAGLIAFERRI, V., CAPRINO, G. & DITERLIZZI, A. 1990. Effect of drilling parameters on the finish and mechanical-properties of GFRP composites. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 30(1), 77 - 84.
- [Tsao, 2008] TSAO, C. C. 2008. Investigation into the effects of drilling parameters on delamination by various step-core drills. *Journal of Materials Processing Technology*, 206(1 - 3), 778 - 783
- [Tsao and Hocheng, 2003] TSAO, C. C. & HOCHENG, H. 2003. The effect of chisel length and associated pilot hole on delamination when drilling composite materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 43(11), 1087 - 1092.

- [Tsao and Hocheng, 2004.] TSAO, C. C. & HOCHENG, H. 2004. Taguchi analysis of delamination associated with various drill bits in drilling of composite material. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 44(10), 1085 - 1090.
- [Tsao and Hocheng, 2005a] TSAO, C. C. & HOCHENG, H. 2005a. Computerized tomography and C-Scan for measuring delamination in the drilling of composite materials using various drills. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(11), 1282 - 1287.
- [Tsao and Hocheng, 2005b] TSAO, C. C. & HOCHENG, H. 2005b. Effect of eccentricity of twist drill and candle stick drill on delamination in drilling composite materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(2), 125 - 130.
- [Tsao and Hocheng, 2005c] TSAO, C. C. & HOCHENG, H. 2005c. Effects of exit back-up on delamination in drilling composite materials using a saw drill and a core drill. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(11), 1261 - 1270.
- [Tsao et al 2011] TSAO, C. C., KUO, K.L., HSU, I. C. 2011. Evaluation of a novel approach to a delamination factor after drilling composite laminates using a core-saw drill. Springer
- [Velayudham et al, 2005] VELAYUDHAM, A., KRISHNAMURTHY, R. & SOUNDARAPANDIAN, T. 2005. Evaluation of drilling characteristics of high volume fraction fibre glass reinforced polymeric composite. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(4-5), 399 - 406.
- [Won and Dharan, 2002a] WON, M. S. & DHARAN, C. K. H. 2002a. Chisel edge and pilot hole effects in drilling composite laminates. *Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the Asme*, 124(2), 242 - 247.

- [Won and Dharan, 2002b] WON, M. S. & DHARAN, C. K. H. 2002b. Drilling of aramid and carbon fiber polymer composites. *Journal of Manufacturing Science and Engineering - Transactions of the Asme*, 124(4), 778 - 783.
- [Zhang et al, 2013] ZHANG, J. G., WANG, X. C., SHEN, B. & SUN, F. H. 2013. Effect of Boron and Silicon Doping on Improving the Cutting Performance of CVD Diamond Coated Cutting Tools in Machining CFRP. *Refractory Metals & Hard Materials*.
- [Zhang et al, 2001a] ZHANG, L. B., WANG, L. J. & LIU, X. Y. 2001a. A mechanical model for predicting critical thrust forces in drilling composite laminates, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B. Journal of Engineering Manufacture*, 215(2), 135 - 146.
- [Zhang et al, 2001b] ZHANG, L. B., WANG, L. J., LIU, X. Y., ZHAO, H. W. & WANG, X. 2001b. Mechanical model for predicting thrust and torque in vibration drilling fibre-reinforced composite materials. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41(5), 641 - 657.

# Capítulo 7

## Anexos

### 7.1 Anexo 1

#### Compósitos laminados de CFRP's

##### Constituintes

Os dois constituintes dos materiais compósitos são designados por matriz e por reforço. A matriz tem como funções dar uma forma estável ao compósito, proteger as fibras do desgaste provocado por elementos exteriores e conferir algumas propriedades como a tenacidade e a resistência química. O reforço é geralmente composto por fibras, o que permite ao compósito atingir excelentes propriedades, pois as fibras de determinados materiais, apresentam propriedades mecânicas amplamente superiores às dos materiais idênticos na sua forma maciça. Este facto foi pela primeira vez demonstrado por *Griffith*, [1920], que constatou que na forma maciça, o vidro possuía tensões de rotura de cerca de 170 MPa, enquanto as fibras de vidro, com cerca de 20 µm de diâmetro, alcançavam tensões de rotura de 3500 Mpa [Durão, 2013].

##### CFRP's

Os materiais compósitos surgiram na indústria em meados do século XX e desde então a sua proliferação tem sido evidente, sendo os CFRP's os que mais se difundiram. Esta proliferação tem como motivo o vasto leque de vantagens que os CFRP's apresentam em relação às soluções tradicionais. Algumas dessas vantagens são as seguintes:

- Elevada resistência à tração.
- Elevado módulo de elasticidade longitudinal.
- Baixa massa específica.
- Elevada condutibilidade elétrica.
- Bom amortecimento estrutural.
- Elevada estabilidade dimensional.
- Bom comportamento à fadiga.
- Boa resistência à corrosão.
- Baixo coeficiente de expansão térmica.

Existem também desvantagens na aplicação de materiais desta natureza, quando comparados com os materiais tradicionais, que têm de algum modo limitado a expansão dos CFRP's a outras áreas e/ou produtos. Algumas destas desvantagens são as seguinte:

- Reduzida resistência ao impacto.
- Baixa condutibilidade térmica.
- Baixa deformação antes da fratura.
- Baixa resistência à compressão.
- Custo elevado.

Fibra de carbono é a designação simples para os compósitos reforçados com fibras de carbono ou grafite, cuja definição correta é “*Carbon Fiber Reinforced Polymer*” (CFRP). Dentro deste grupo, existem dois tipos de fibras a serem consideradas, as fibras de carbono propriamente ditas, com percentagens de carbono entre 80 e 95%, e as fibras de grafite onde a percentagem de carbono chega aos 99%. Estas últimas são aplicadas em compósitos de elevado desempenho mecânico. Na tabela 7.1 estão algumas propriedades mecânicas de alguns tipos de fibra de carbono [Durão, 2013].

Tabela 7.1: Propriedades de alguns tipos de fibra de carbono. [Moura et al., 2011]

| Propriedade  | PAN         | Alcatrão “Pitch” | “Rayon fibers” |
|--|-------------|------------------|----------------|
| Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )                            | 1.8         | 2.0              | 1.7            |
| Módulo de Young  | 200 - 400   | 300 - 700        | 415 - 680      |
| Tensão de rotura (MPa)                                   | 2480 - 5600 | 1900 - 2200      | 2070 - 2760    |
| Deformação na rotura                                     | 0.6 - 1.2   | 1 - 1.5          | 0.5 - 0.6      |
| C. expansão térmica axial ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) | -0.7 a -0.5 | -1.6 a -0.9      | -              |



Quanto às matrizes de natureza polimérica, existem também dois tipos a serem considerados, as matrizes termoplásticas e as termoendurecíveis.

As matrizes termoplásticas são constituídas por macromoléculas individuais lineares, não existindo qualquer reticulação entre si. As forças que ligam estas moléculas de grande dimensão são de natureza intermolecular, como as pontes de hidrogénio e as forças de van der Waals. É esta estrutura interna que permite a conformação repetida de peças desta natureza, pois ao aquecer este tipo de polímeros, as ligações rompem conferindo-lhes liberdade intermolecular (diminuição da viscosidade), possibilitando assim a manipulação geométrica de qualquer peça. Uma vez obtida a geometria pretendida, através do arrefecimento as ligações intermoleculares restabelecem-se restituindo rigidez estrutural à peça. Este mecanismo garante ainda a reciclabilidade de produtos de natureza termoplástica, o que na conjuntura atual é importantíssimo. A utilização deste tipo de polímero é apenas condicionada pela dificuldade de impregnação do reforço, o que surge do elevado coeficiente de viscosidade que o polímero apresenta, mesmo quando aquecido. Na tabela 7.2 estão algumas propriedades de alguns termoplásticos [Moura *et al.*, 2011].

Tabela 7.2: Propriedades típicas de alguns termoplásticos. [Moura *et al.*, 2011]

| Polímero | Tipo | $T_g(^{\circ}\text{C})$ | $T_m(^{\circ}\text{C})$ | HDT ( $^{\circ}\text{C}$ ) |     | E (GPa) |      | $\sigma_{\mu}$ (MPa) |     | $\varepsilon_{\mu}$ (%) |     |
|----------|------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|-----|---------|------|----------------------|-----|-------------------------|-----|
|          |      |                         |                         | NR                         | R   | NR      | R    | NR                   | R   | NR                      | R   |
| PC       | A    | 150                     |                         | 132                        | 149 | 2.4     | 9.0  | 65                   | 131 | 125                     | 2.5 |
| PP       | C    | -10                     | 165                     | 53                         | 151 | 1.4     | 5.9  | 34                   | 83  | 400                     | 2.3 |
| PA66     | C    | 50                      | 265                     | 90                         | 252 | 2.9     | 9.0  | 83                   | 172 | 200                     | 4   |
| PSU      | A    | 190                     |                         | 175                        | 185 | 2.5     |      | 70                   | 120 | 3                       | 1.5 |
| PEI      | A    | 220                     |                         | 204                        | 210 |         | 9.0  |                      | 200 |                         |     |
| PI       | A    | 280                     |                         | 270                        | 275 |         |      |                      |     |                         |     |
| PPS      | C    | 130                     | 280                     | 137                        | 265 | 3.3     | 11.0 | 74                   | 130 | 110                     | 1   |
| PEEK     | C    | 150                     | 310                     | 148                        | 286 |         | 9.0  | 98                   | 190 |                         |     |

As matrizes termoendurecíveis, também designadas como resinas termoendurecíveis, são compostas por dois ou três componentes: a resina, o acelerador e o catalisador, que quando misturados nas proporções adequadas, as suas moléculas formam estruturas tri-dimensionais bastante rígidas, devido ao fenómeno da polimerização. Este processo tem habitualmente o nome de “cura” e pode ocorrer à temperatura ambiente para algumas resinas. Para outros casos, é necessário recorrer a estufas ou fornos para aplicação de calor

ao processo e/ou recorrer a mecanismos de aplicação de pressão nas peças. O método de produção permite assim a conformação do polímero, devido ao baixo coeficiente de viscosidade inicial, mas impede que após o processo de “cura” seja possível o reproprocessamento do material, permitindo a sua reciclagem. Este mecanismo garante uma das maiores vantagens sobre as matrizes termoplásticas, pois o baixo coeficiente de viscosidade que estas matrizes termoendurecíveis apresentam antes da cura, facilita a impregnação dos reforços. Na tabela 7.3 estão algumas propriedades mecânicas das resinas termoendurecíveis [Moura *et al.*, 2011].

Tabela 7.3: Propriedades de resinas termoendurecíveis. [Moura *et al.*, 2011]

| Resina            |                         | HDT<br>(°C) | E<br>(GPa) | $\sigma_\mu$<br>(MPa) | $\varepsilon_\mu$<br>(%) |
|-------------------|-------------------------|-------------|------------|-----------------------|--------------------------|
| Poliester         | Ortoftálica             | 66          | 3.6        | 55                    | 2.0                      |
|                   | Ortoftálica             | 95          | 3.3        | 70                    | 3.5                      |
|                   | Isoftálica              | 93          | 4.1        | 65                    | 2.5                      |
|                   | Isoftálica              | 125         | 3.7        | 55                    | 1.5                      |
| Fenólica          | Ressol                  | 250         | 2.0        | 32                    | 1.8                      |
| Vinilester        | Bisfenol A              | 102         | 3.5        | 82                    | 6.0                      |
|                   | Novolac                 | 150         | 3.5        | 68                    | 3.5                      |
| Epoxidas<br>DGEBA | $T_c=20^\circ\text{C}$  | 62          | 3.2        | 62                    | 2.0                      |
|                   | $T_c=120^\circ\text{C}$ | 121         | 3.0        | 90                    | 8.0                      |
| Epóxida<br>DGEBF  | $T_c=120^\circ\text{C}$ | 110         | 4.1        | 125                   | 5.0                      |

## 7.2 Anexo 2

### Nomenclatura e geometria das brocas

Uma broca é composta por três elementos diferentes, a haste, o corpo e a ponta.

#### Haste

A haste ou “*shank*” é a parte da ferramenta que possibilita o aperto da mesma à máquina de furação. Como se pode ver na figura 7.1 existem dois tipos de hastes, as cilíndricas e as cónicas. No caso da geometria cónica, as ferramentas apresentam duas faces maquinadas na sua extremidade, de modo a evitar escorregamento da mesma durante o processo de furação a esta característica dá-se o nome de espiga ou lingueta. [Steve and Albert, 1997]

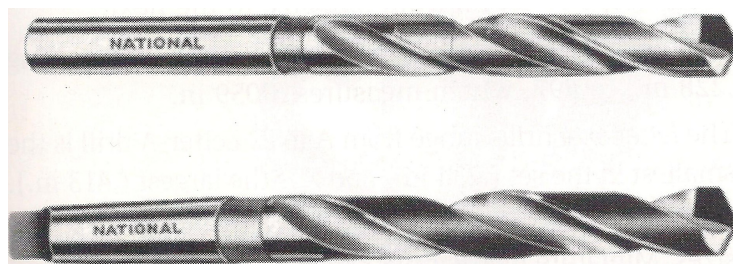


Figura 7.1: Diferentes tipos de hastes [Steve and Albert, 1997]

#### Corpo

O corpo das brocas helicoidais é a parte entre a haste e a ponta da broca. Esta zona da ferramenta possui características geométricas que influenciam diretamente a eficiência de corte da mesma. Na figura 7.2 está representada uma broca helicoidal tradicional e é indicada a nomenclaturas das suas características geométricas [Steve and Albert, 1997].

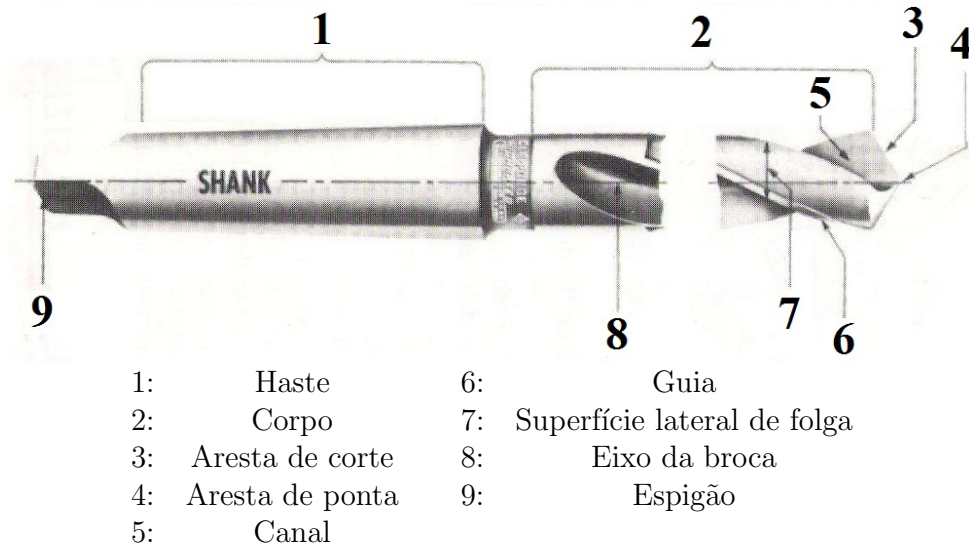


Figura 7.2: Características geométricas de uma broca helicoidal tradicional. [Steve and Albert, 1997]

1. Os canais ou “flutes”, são dois rasgos helicoidais ao longo do comprimento útil da ferramenta que formam arestas de corte na ponta e permitem que as aparas, ou cavacos, sejam removidos durante o processo de furação.

2. A guia ou “margin” é a secção encostada às flautas que se estende ao longo das mesmas e que está ligeiramente mais elevada para providenciar ao corpo da broca o diâmetro desejado.

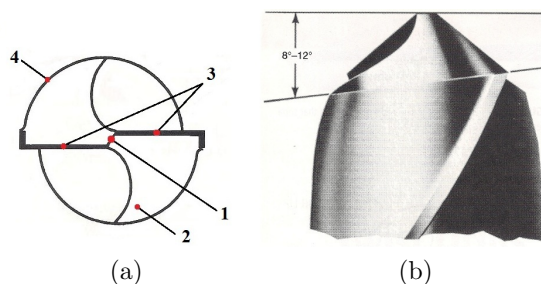
3. A superfície lateral de folga ou “body clearance” é a superfície que se estende entre as margens do corpo da broca. Tem um diâmetro mais pequeno para reduzir a fricção entre a ferramenta e o furo durante o processo de furação.

4 A teia ou “web” é uma coluna metálica presente ao longo dos canais que forma, na ponta da ferramenta, a aresta de ponta ou “chisel edge” que vai ligar as duas arestas de corte principais.

### Ponta

A ponta ou “point” da broca é composta por quatro componentes, a aresta ou gume de ponta (“chisel edge”), as arestas de corte (“cutting edge”), a superfície de folga (“heel”) e a superfície lateral de folga (“body clearance”). Na figura 7.3a está esquematizada a ponta de uma broca helicoidal, assim como a discretização dos seus elementos e na figura 7.3b pode ver-se a imagem de perfil da ponta de uma broca helicoidal, onde está representado o ângulo de folga da aresta de corte cujo valor deve oscilar entre os 8º e os 12º. Como se pode verificar, as arestas de corte principal são compostas pela interseção dos canais

e têm de ter o mesmo ângulo e o mesmo comprimento para que os furos realizados não tenham um diâmetro superior ao diâmetro da broca [Steve and Albert, 1997].



- |                        |                                |
|------------------------|--------------------------------|
| 1: Aresta de ponta     | 3: Arestas de corte            |
| 2: Superfície de folga | 4: Superfície lateral de folga |

Figura 7.3: a) Esquemática da ponta de uma broca helicoidal; b) Perfil da ponta de uma broca helicoidal [Steve and Albert, 1997].

A furação eficiente de uma vasta gama de materiais requer uma cuidada seleção dos elementos geométricos da ponta da broca. É a variação desses elementos que define a aplicabilidade de uma broca helicoidal para a furação de um material em detrimento de outro. Na figura 7.4 estão representados os elementos que compõem a ponta de uma broca helicoidal.

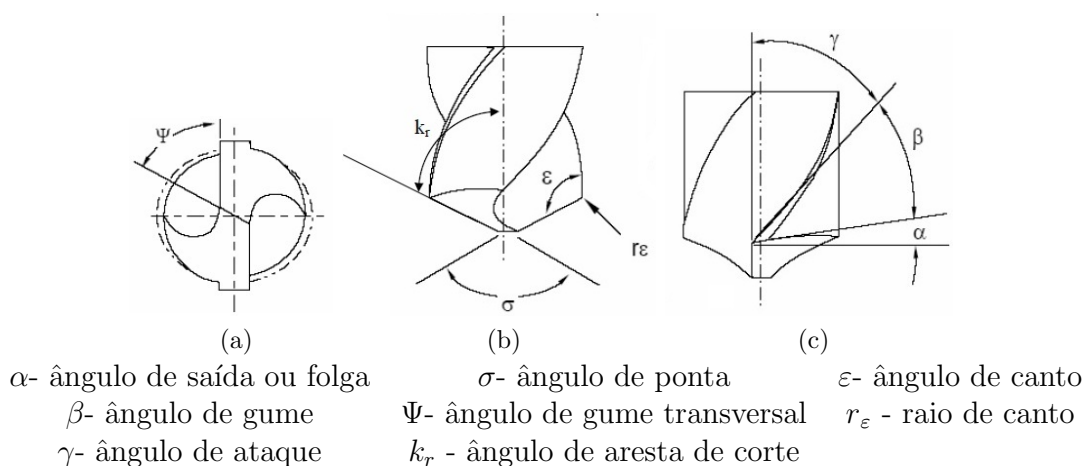


Figura 7.4: Características geométricas da brocas helicoidais [Reis, 2005].

Usualmente são usados três ângulos de ponta distintos para a furação dos materiais tradicionais, contudo podem surgir variações para acomodar condições de corte específicas.

O ângulo de  $118^\circ$  é o mais indicado para a furação da maioria dos materiais. As brocas com ângulos de ponta entre os  $60^\circ$  e  $90^\circ$  são mais indicados para materiais dúcteis, enquanto as brocas com ângulos de ponta entre os  $135^\circ$  e os  $150^\circ$  apresentam um melhor desempenho para materiais duros [*Steve and Albert, 1997*].

## 7.3 Anexo 3

### Exemplos de furos que apresentam delaminagem

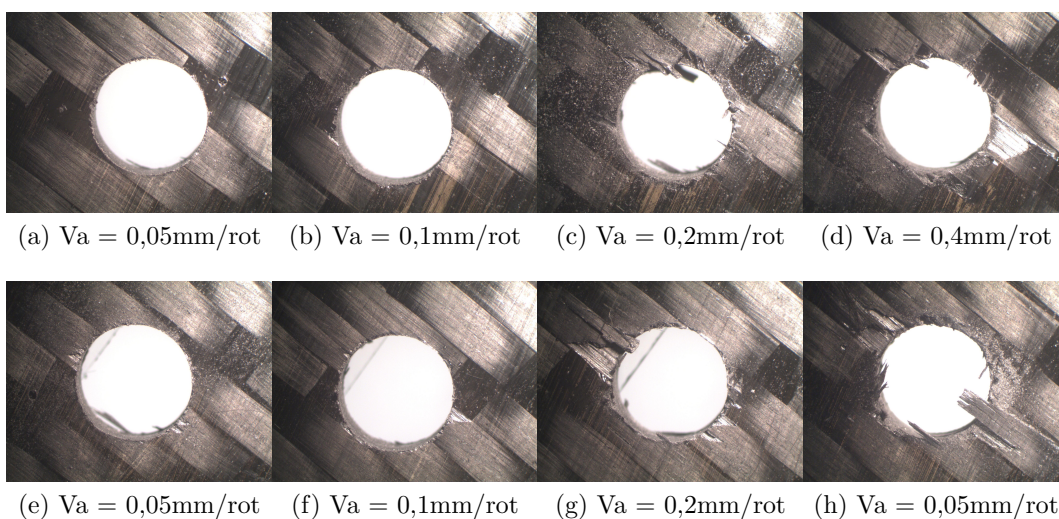


Figura 7.5: Imagens obtidas por microscopia ótica dos furos realizados com a ferramenta A (“TiN”,  $140^\circ$ ) a uma velocidade de rotação de 938rpm (Ampliação de 60x).

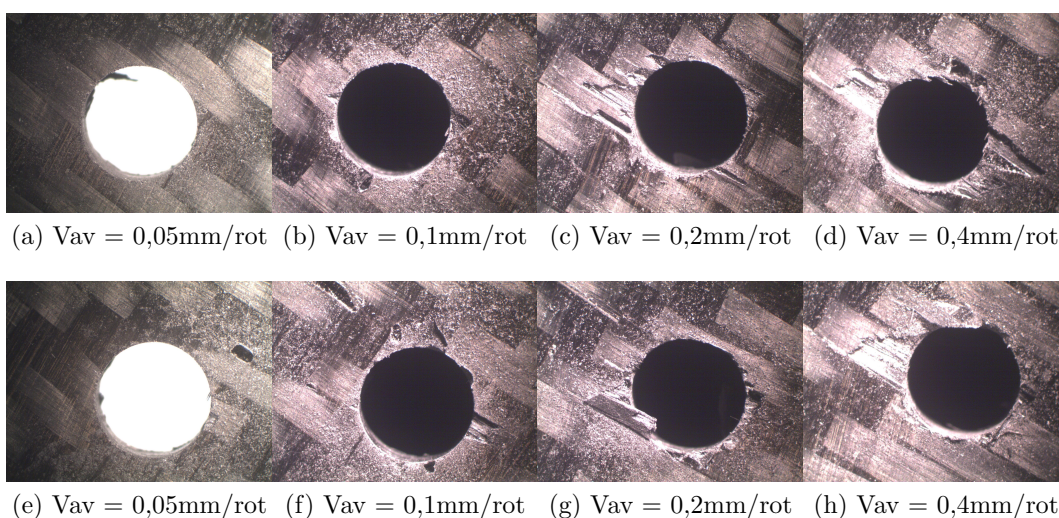


Figura 7.6: Imagens obtidas por microscopia ótica dos furos realizados com a ferramenta B (“Diamond”,  $120^\circ$ ) a uma velocidade de 938rpm’s (Ampliação de 60x).



## 7.4 Anexo 4

### Imagens dos defeitos presentes na superfície dos compósitos

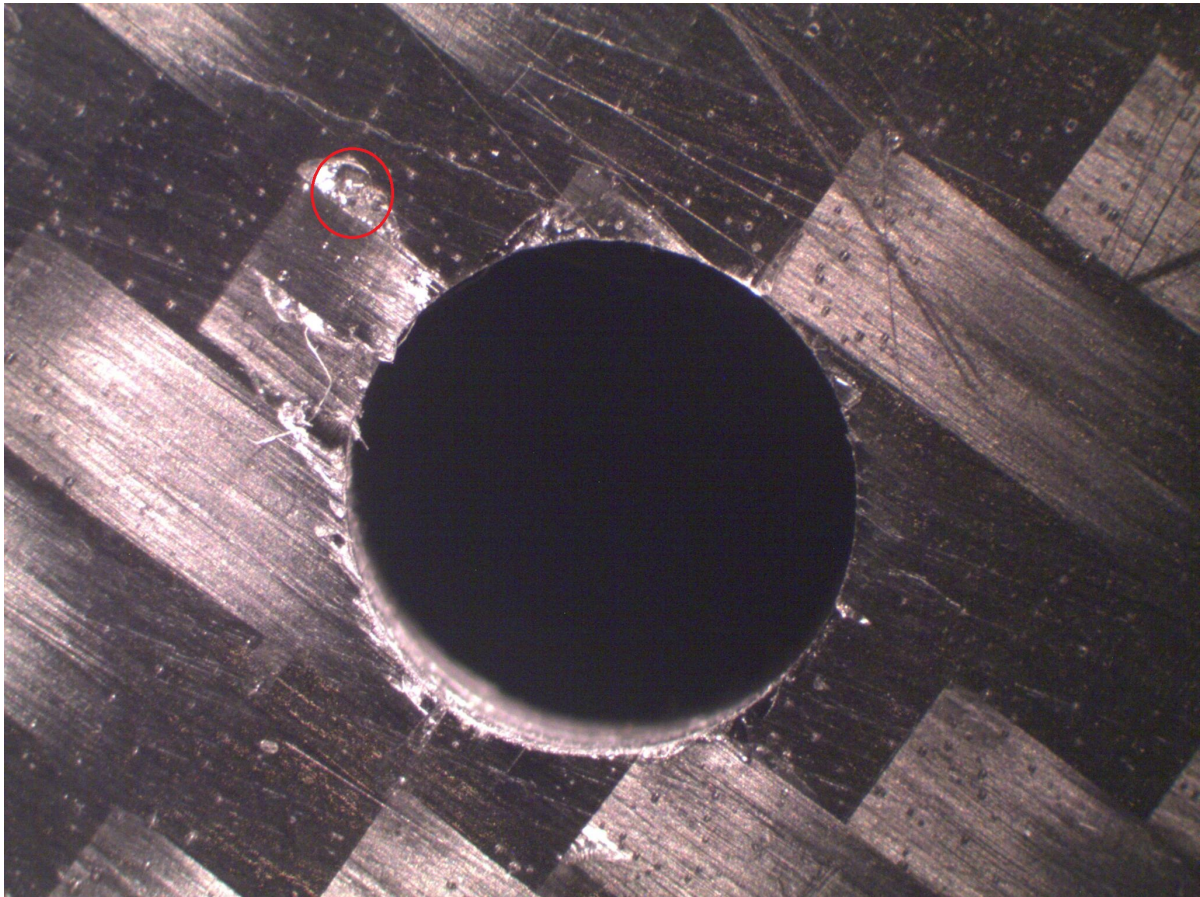


Figura 7.7: Imagem de um furo com defeitos localizados próximo da zona de furação que provocam um aumento súbito da delaminação.



## 7.5 Anexo 5

### Características das ferramentas utilizadas

Tabela 7.4: Ficha do fabricante ferramenta A (“TiN”, 140°).

|             |                                  |   |
|-------------|----------------------------------|---|
| ADINTMS     | interface adaptável              | <i>“Cylindrical shank w/ no clamping”</i> |
| CZC         | código de tamanho da conexão     | 6   |
| DC          | diâmetro de corte                | 5 mm                                      |
| LU          | comprimento útil                 | 35 mm                                     |
| OAL         | comprimento total                | 66 mm                                     |
| LCF         | comp. do canal para cavacos      | 44 mm                                     |
| PL          | comprimento da ponta             | 0.909926 mm                               |
| SIG         | ângulo da ponta                  | 140°                                      |
| OHX         | balanço máximo                   | 46 mm                                     |
| BSG         | grupo básico standard            | DIN 6537 L                                |
| TCHA        | tolerância atingível do furo     | H9  |
| CNSC        | cód. entrada de refrigeração     | 1: <i>“axial concentric entry”</i>        |
| TSYC        | código da ferramenta             | R846..30-A1A                              |
| GRADE       | classe                           | 1220                                      |
| ZEFF        | n° de arestas de corte - frontal | 2   |
| LF          | comprimento útil                 | 65.090074 mm                              |
| HAND        | versão                           | R   |
| GAMO        | ângulo de saída ortogonal        | 13.85759424°                              |
| WT          | peso do item                     | 0.04 kg                                   |
| SUBOP       | suboperação                      | <i>“Drilling with Symetrical Point”</i>   |
| FEEDDIRCODE | código de direção do avanço      | EFW                                       |
| COATING     | cobertura                        | PVD                                       |
| BMC         | código do material do corpo      | <i>“Carbide”</i>                          |
| CP          | pressão de refrigeração          | 20 bar                                    |
| CXSC        | código de saída de refrigeração  | 1: <i>“axial concentric exit”</i>         |
| DCON        | diâmetro de conexão              | 6 mm                                      |
| FDC         | código do desenho do canal       | SSK                                       |
| FHA         | ângulo de hélice do canal        | 27.71518849°                              |
| FHH         | versão de hélice do canal        | R   |
| ITEMTYPE    | tipo do item                     | <i>“Solid Cutting Tool”</i>               |
| LPR         | comprimento da saliência         | 66 mm                                     |
| LS          | Comprimento da haste             | 36 mm                                     |
| NOF         | número de canais                 | 2   |
| NORGMX      | número máximo de reafiações      | 3   |

Tabela 7.5: Ficha do fabricante ferramenta A (“TiN”, 140°) (continuação).

|             |                                      |  |
|-------------|--------------------------------------|--|
| RELEASEPACK | ID de lançamento do pacote           | 08.1                                     |
| RGF3        | fator de vida útil para 3 reafiações | 0.9 NULL                                 |
| RGF4        | fator de vida útil para 4 reafiações | 0 NULL                                   |
| RGL         | comprimento da reafiação             | 6 mm                                     |
| RPMX        | rotação máxima                       | 50000 rpm                                |
| SUBSTRATE   | substrato                            | HM                                       |
| TCDC        | classe tolerância do diâm. de corte  | m7                                       |
| TCHAU       | maior tolerância atingível do furo   | 5.03 mm                                  |
| TMC1        | classificação de materiais nível 1   | <i>“Heat resistant and titanium all”</i> |
| ULDR        | relação comprimento/diâmetro útil    | 7  |

Tabela 7.6: Ficha do fabricante ferramenta B (“Diamond”, 120°).

|             |                                  |   |
|-------------|----------------------------------|---|
| ADINTMS     | interface adaptável              | <i>“Cylindrical shank w/ no clamping”</i> |
| CZC         | código de tamanho da conexão     | 6   |
| DC          | diâmetro de corte                | 5 mm                                      |
| LU          | comprimento útil                 | 35 mm                                     |
| OAL         | comprimento total                | 82 mm                                     |
| LCF         | comp. do canal para cavacos      | 44 mm                                     |
| PL          | comprimento da ponta             | 2.63 mm                                   |
| SIG         | ângulo da ponta                  | 120°                                      |
| OHX         | balanço máximo                   | 46 mm                                     |
| BSG         | grupo básico standard            | DIN 6537 L                                |
| TCHA        | tolerância atingível do furo     | H9  |
| CNSC        | cód. de entrada de refrigeração  | 0: s/ refrigeração                        |
| TSYC        | código da ferramenta             | 856.1                                     |
| GRADE       | classe                           | N20C                                      |
| ZEFF        | n° de arestas de corte - frontal | 2   |
| LF          | comprimento útil                 | 79.37 mm                                  |
| HAND        | versão                           | R   |
| GAMO        | ângulo de saída ortogonal        | 12.86329881°                              |
| WT          | peso do item                     | 0.04 kg                                   |
| SUBOP       | suboperação                      | <i>“Drilling with Symetrical Point”</i>   |
| FEEDDIRCODE | código de direção do avanço      | EFW                                       |
| COATING     | cobertura                        | <i>“Diamond”</i>                          |
| BMC         | código do material do corpo      | <i>“Carbide”</i>                          |
| CXSC        | código de saída de refrigeração  | 0: s/ saída de refrigeração               |
| DCON        | diâmetro de conexão              | 6 mm                                      |
| FDC         | código do desenho do canal       | SSK                                       |
| FHA         | ângulo de hélice do canal        | 25.72659762°                              |
| FHH         | versão de hélice do canal        | R   |
| ITEMTYPE    | tipo do item                     | <i>“Solid Cutting Tool”</i>               |
| LPR         | comprimento da saliência         | 82 mm                                     |
| LS          | Comprimento da haste             | 36 mm                                     |
| NOF         | número de canais                 | 2   |
| NORGMX      | número máximo de reafiações      | 3   |

Tabela 7.7: Ficha do fabricante ferramenta B (“*Diamond*”, 120º) (continuação).

|             |                                      |           |
|-------------|--------------------------------------|-----------|
| RELEASEPACK | ID de lançamento do pacote           | 10.1      |
| RGF3        | fator de vida útil para 3 reafiações | 0.9 NULL  |
| RGF4        | fator de vida útil para 4 reafiações | 0 NULL    |
| RGL         | comprimento da reafiação             | 6 mm      |
| RPMX        | rotação máxima                       | 50000 rpm |
| SUBSTRATE   | substrato                            | HM        |
| TCDC        | tolerância do diâm. de corte         | m7        |
| TCHAU       | maior tolerância atingível do furo   | 5.03 mm   |

Tabela 7.8: Ficha do fabricante ferramenta C (convencional, 140°).

|             |  |   |
|-------------|--|---|
| ADINTMS     | interface adaptável                      | <i>“Cylindrical shank w/ no clamping”</i> |
| CZC         | código de tamanho da conexão             | 6   |
| DC          | diâmetro de corte                        | 5 mm                                      |
| LU          | comprimento útil                         | 35 mm                                     |
| OAL         | comprimento total                        | 66 mm                                     |
| LCF         | comprimento do canal para cavacos        | 44 mm                                     |
| PL          | comprimento da ponta                     | 0.84 mm                                   |
| SIG         | ângulo da ponta                          | 140°                                      |
| OHX         | balanço máximo                           | 46 mm                                     |
| BSG         | grupo básico standard                    | DIN 6537 L                                |
| TCHA        | tolerância atingível do furo             | H9  |
| CNSC        | cód. entrada de refrigeração             | 0: s/ refrigeração                        |
| TSYC        | código da ferramenta                     | R842..30-A0A                              |
| GRADE       | classe                                   | 1210                                      |
| ZEFF        | n° efetivo de arestas de corte - frontal | 2   |
| LF          | comprimento útil                         | 65.16 mm                                  |
| HAND        | versão                                   | R   |
| GAMO        | ângulo de saída ortogonal                | 13.85759424°                              |
| WT          | peso do item                             | 0.027 kg                                  |
| SUBOP       | sub operação                             | <i>“Drilling with Symetrical Point”</i>   |
| FEEDDIRCODE | código de direção do avanço              | EFW                                       |
| COATING     | cobertura                                | PVD                                       |
| BMC         | código do material do corpo              | <i>“Carbide”</i>                          |
| CXSC        | código de saída de refrigeração          | 0: s/saída de refrigeração                |
| DCON        | diâmetro de conexão                      | 6 mm                                      |
| FDC         | código do desenho do canal               | SSK                                       |
| FHA         | ângulo de hélice do canal                | 27.71518849°                              |
| FHH         | versão de hélice do canal                | R   |
| ITEMTYPE    | tipo do item                             | <i>“Solid Cutting Tool”</i>               |
| LPR         | comprimento da saliência                 | 66 mm                                     |
| LS          | Comprimento da haste                     | 36 mm                                     |
| NOF         | número de canais                         | 2   |
| NORGMX      | número máximo de reafiações              | 3   |

Tabela 7.9: Ficha do fabricante ferramenta C (convencional, 140º) (continuação).

|             |  |           |
|-------------|--|-----------|
| RELEASEPACK | ID de lançamento do pacote             | 05.2      |
| RGF3        | fator de vida útil para 3 reafiações   | 0.9 NULL  |
| RGF4        | fator de vida útil para 4 reafiações   | 0 NULL    |
| RGL         | comprimento da reafiação               | 6 mm      |
| RPMX        | rotação máxima                         | 50000 rpm |
| SUBSTRATE   | substrato                              | HM        |
| TCDC        | classe de tolerância do diâm. de corte | m7        |
| TCHAU       | maior tolerância atingível do furo     | 5.03 mm   |
| ULDR        | relação comprimento/diâmetro útil      | 7         |

## 7.6 Anexo 6

### Características do centro de maquinagem

Tabela 7.10: Características do centro de maquinagem

| MIKRON VCE 500 <sup>®</sup>                 |                       |
|---|-----------------------|
| Controlador                                 | HASS                  |
| Velocidade máxima de rotação                | 7500 rpm              |
| Potência máxima                             | 11 kW                 |
| Velocidade máxima de avanço                 | 7600 mm/min           |
| Dimensões de trabalho X,Y,Z                 | 508 x 406 x 508 mm    |
| Movimentos rápidos, X,Y,Z                   | 18 m/min              |
| Repetibilidade                              | $\pm 2.5 \mu\text{m}$ |
| Precisão                                    | $\pm 5 \mu\text{m}$   |
| Número de eixos standard                    | 3                     |
| Sistema de fixação de ferramentas na árvore | Cone ISO 40/BT 40     |
| Capacidade do armazém de ferramentas        | 20                    |





## 7.7 Anexo 7

### Resultado numéricos: Parâmetros processuais.

| Entrada Ferramenta A |                 |                 |             |             |           |        |                      |        |        |
|----------------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|-----------|--------|----------------------|--------|--------|
| Parâmetros           |                 |                 | Ensaio 1    |             | Ensaio 2  |        | Quantidade de Pixels |        |        |
|                      | Vrot<br>[rpm/s] | Vav<br>[mm/min] | Delaminagem | Delaminagem | Del Media | F1_Ain | F2_Ain               | F3_Ain | F4_Ain |
| Placa Ain            | A               | 938             | 94          | 1,014       | 1,056     | 1,035  | 624                  | 1840   | 5349   |
|                      | B               | 938             | 188         | 1,042       | 1,079     | 1,061  | 11515                | 3100   | 11047  |
|                      | C               | 938             | 375         | 1,122       | 1,189     | 1,156  | 1229                 | 18987  | 654    |
|                      | D               | 938             | 750         | 1,263       | 1,257     | 1,260  | 5333                 | 9124   | 9296   |
|                      | E               | 1875            | 188         | 1,028       | 1,036     | 1,032  | 2654                 | 2398   | 6971   |
|                      | F               | 1875            | 375         | 1,071       | 1,154     | 1,112  | 12954                | 12954  | 12954  |
|                      | G               | 1875            | 750         | 1,253       | 1,162     | 1,207  | 1506                 | 1506   | 1506   |
|                      | H               | 1875            | 1500        | 1,434       | 1,430     | 1,432  | 1506                 | 1506   | 1506   |
| Placa Bin            | I               | 3750            | 375         | 1,015       | 1,023     | 1,019  | 654                  | 5333   | 9124   |
|                      | J               | 3750            | 750         | 1,122       | 1,086     | 1,104  | 9296                 | 9296   | 9296   |
|                      | K               | 3750            | 1500        | 1,209       | 1,198     | 1,203  | 2654                 | 2398   | 6971   |
|                      | L               | 3750            | 3000        | 1,213       | 1,153     | 1,183  | 12954                | 12954  | 12954  |
|                      | M               | 7500            | 750         | 1,061       | 1,034     | 1,048  | 1506                 | 1506   | 1506   |
|                      | N               | 7500            | 1500        | 1,055       | 1,062     | 1,058  | 1506                 | 1506   | 1506   |
|                      | O               | 7500            | 3000        | 1,159       | 1,278     | 1,219  | 1506                 | 1506   | 1506   |
|                      | P               | 7500            | 5000        | 1,296       | 1,343     | 1,319  | 1506                 | 1506   | 1506   |

| Saída Ferramenta A |              |             |  |             |  |                      |          |          |          |
|--------------------|--------------|-------------|--|-------------|--|----------------------|----------|----------|----------|
| Parâmetros         |              | Ensaio 1    |  | Ensaio 2    |  | Quantidade de Pixels |          |          |          |
| Vrot [rpm]         | Vav [mm/rot] | Delaminagem |  | Delaminagem |  | Del Media            | F1_Aout  | F2_Aout  | F3_Aout  |
| 938                | 0,05         | 1,151       |  | 1,056       |  | 1,104                | F1_Aout  | F2_Aout  | F3_Aout  |
| 938                | 0,1          | 1,108       |  | 1,040       |  | 1,074                | F3_Aout  | F4_Aout  | F4_Aout  |
| 938                | 0,2          | 1,021       |  | 1,023       |  | 1,022                | F5_Aout  | F6_Aout  | F6_Aout  |
| 938                | 0,4          | 1,030       |  | 1,042       |  | 1,036                | F7_Aout  | F8_Aout  | F8_Aout  |
| 1875               | 0,05         | 1,045       |  | 1,108       |  | 1,076                | F9_Aout  | F10_Aout | F10_Aout |
| 1875               | 0,1          | 1,098       |  | 1,060       |  | 1,079                | F11_Aout | F12_Aout | F12_Aout |
| 1875               | 0,2          | 1,031       |  | 1,026       |  | 1,029                | F13_Aout | F14_Aout | F14_Aout |
| 1875               | 0,4          | 1,031       |  | 1,036       |  | 1,034                | F15_Aout | F16_Aout | F16_Aout |
| 3750               | 0,05         | 1,079       |  | 1,171       |  | 1,125                | F1_Bout  | F2_Bout  | F2_Bout  |
| 3750               | 0,1          | 1,049       |  | 1,036       |  | 1,042                | F3_Bout  | F4_Bout  | F4_Bout  |
| 3750               | 0,2          | 1,049       |  | 1,036       |  | 1,043                | F5_Bout  | F6_Bout  | F6_Bout  |
| 3750               | 0,4          | 1,033       |  | 1,036       |  | 1,035                | F7_Bout  | F8_Bout  | F8_Bout  |
| 7500               | 0,05         | 1,128       |  | 1,139       |  | 1,134                | F9_Bout  | F10_Bout | F10_Bout |
| 7500               | 0,1          | 1,068       |  | 1,068       |  | 1,068                | F11_Bout | F12_Bout | F12_Bout |
| 7500               | 0,2          | 1,036       |  | 1,064       |  | 1,050                | F13_Bout | F14_Bout | F14_Bout |
| 7500               | 0,33         | 1,062       |  | 1,032       |  | 1,047                | F15_Bout | F16_Bout | F16_Bout |

Figura 7.9: Resultados numéricos para saída, ferramenta A ( $TiN$ ,  $140^{\circ}$ ).

| Entrada Ferramenta B |                 |             |             |           |                      |         |       |         |      |
|----------------------|-----------------|-------------|-------------|-----------|----------------------|---------|-------|---------|------|
| Parâmetros           |                 | Ensaio 1    | Ensaio 2    |           | Quantidade de Pixels |         |       |         |      |
| Vrot<br>[rpm]        | Vav<br>[mm/rot] | Delaminagem | Delaminagem | Del Media |                      |         |       |         |      |
| Placa<br>Cin         | 938             | 0,05        | 1,013       | 1,011     | 1,012                | F1_Cin  | 575   | F2_Cin  | 489  |
|                      | 938             | 0,1         | 1,018       | 1,020     | 1,019                | F3_Cin  | 808   | F4_Cin  | 855  |
|                      | 938             | 0,2         | 1,031       | 1,059     | 1,045                | F5_Cin  | 1363  | F6_Cin  | 2565 |
|                      | 938             | 0,4         | 1,108       | 1,094     | 1,101                | F7_Cin  | 4707  | F8_Cin  | 4094 |
|                      | 1875            | 0,05        | 1,023       | 1,010     | 1,016                | F9_Cin  | 989   | F10_Cin | 424  |
|                      | 1875            | 0,1         | 1,014       | 1,019     | 1,016                | F11_Cin | 607   | F12_Cin | 821  |
|                      | 1875            | 0,2         | 1,030       | 1,033     | 1,032                | F13_Cin | 1323  | F14_Cin | 1458 |
|                      | 1875            | 0,4         | 1,105       | 1,140     | 1,123                | F15_Cin | 4588  | F16_Cin | 6124 |
| Placa<br>Din         | 3750            | 0,05        | 1,024       | 1,026     | 1,025                | F1_Din  | 1060  | F2_Din  | 1158 |
|                      | 3750            | 0,1         | 1,015       | 1,022     | 1,018                | F3_Din  | 643   | F4_Din  | 969  |
|                      | 3750            | 0,2         | 1,021       | 1,038     | 1,029                | F5_Din  | 898   | F6_Din  | 1669 |
|                      | 3750            | 0,4         | 1,123       | 1,131     | 1,127                | F7_Din  | 5389  | F8_Din  | 5715 |
|                      | 7500            | 0,05        | 1,031       | 1,001     | 1,016                | F9_Bin  | 1361  | F10_Din | 47   |
|                      | 7500            | 0,1         | 1,028       | 1,036     | 1,032                | F11_Bin | 1223  | F12_Din | 1579 |
|                      | 7500            | 0,2         | 1,017       | 1,102     | 1,060                | F13_Bin | 729   | F14_Din | 4475 |
|                      | 7500            | 0,33        | 1,275       | 1,222     | 1,249                | F15_Bin | 12033 | F16_Din | 9716 |

Figura 7.10: Resultados numéricos para entrada, ferramenta B (“Diamond”, 120<sup>0</sup>).

| Saída Ferramenta B |                 |             |             |                      |         |         |         |          |          |  |
|--------------------|-----------------|-------------|-------------|----------------------|---------|---------|---------|----------|----------|--|
| Parâmetros         |                 | Ensaio 1    | Ensaio 2    | Quantidade de Pixels |         |         |         |          |          |  |
| Vrot<br>[rpm]      | Vav<br>[mm/rot] | Delaminagem | Delaminagem | Del Media            | F1_Cout | F2_Cout | F3_Cout | F4_Cout  | F5_Cout  |  |
|                    |                 |             |             |                      | F7_Cout | F8_Cout | F9_Cout | F10_Cout | F11_Cout |  |
| Placa<br>Cout      | 938             | 0,05        | 1,075       | 1,041                | 1,058   | 3280    | 1785    |          |          |  |
|                    | 938             | 0,1         | 1,024       | 1,032                | 1,028   | 1043    | 1409    |          |          |  |
|                    | 938             | 0,2         | 1,015       | 1,022                | 1,018   | 656     | 956     |          |          |  |
|                    | 938             | 0,4         | 1,020       | 1,026                | 1,023   | 860     | 1133    |          |          |  |
|                    | 1875            | 0,05        | 1,038       | 1,068                | 1,053   | 1655    | 2986    |          |          |  |
|                    | 1875            | 0,1         | 1,020       | 1,016                | 1,018   | 885     | 694     |          |          |  |
|                    | 1875            | 0,2         | 1,047       | 1,015                | 1,031   | 2070    | 652     |          |          |  |
|                    | 1875            | 0,4         | 1,032       | 1,017                | 1,024   | 1383    | 730     |          |          |  |
| Placa<br>Dout      | 3750            | 0,05        | 1,013       | 1,055                | 1,034   | 572     | 2392    |          |          |  |
|                    | 3750            | 0,1         | 1,012       | 1,018                | 1,015   | 525     | 777     |          |          |  |
|                    | 3750            | 0,2         | 1,012       | 1,013                | 1,012   | 522     | 569     |          |          |  |
|                    | 3750            | 0,4         | 1,018       | 1,010                | 1,014   | 774     | 429     |          |          |  |
|                    | 7500            | 0,05        | 1,022       | 1,157                | 1,090   | 961     | 6882    |          |          |  |
|                    | 7500            | 0,1         | 1,050       | 1,024                | 1,037   | 2200    | 1031    |          |          |  |
|                    | 7500            | 0,2         | 1,017       | 1,018                | 1,017   | 732     | 769     |          |          |  |
|                    | 7500            | 0,33        | 1,014       | 1,014                | 1,014   | 622     | 596     |          |          |  |

Figura 7.11: Resultados numéricos para saída, ferramenta B (“Diamond”, 120°).



| Entrada Ferramenta C |                 |             |       |             |       |                      |       |
|----------------------|-----------------|-------------|-------|-------------|-------|----------------------|-------|
| Parâmetros           |                 | Ensaio 1    |       | Ensaio 2    |       | Quantidade de Pixels |       |
| Vrot<br>[rpm]        | Vav<br>[mm/rot] | Delaminagem |       | Delaminagem |       | Del Media            |       |
| Placa Ein            | 938             | 0,05        | 1,030 | 1,043       | 1,037 | F1_Ein               | 1322  |
|                      | 938             | 0,1         | 1,028 | 1,068       | 1,048 | F3_Ein               | 1243  |
|                      | 938             | 0,2         | 1,115 | 1,147       | 1,131 | F5_Ein               | 5039  |
|                      | 938             | 0,4         | 1,225 | 1,262       | 1,243 | F7_Ein               | 9831  |
|                      | 1875            | 0,05        | 1,028 | 1,038       | 1,033 | F9_Ein               | 1232  |
|                      | 1875            | 0,1         | 1,036 | 1,034       | 1,035 | F11_Ein              | 1556  |
|                      | 1875            | 0,2         | 1,184 | 1,165       | 1,175 | F13_Ein              | 8064  |
|                      | 1875            | 0,4         | 1,391 | 1,207       | 1,299 | F15_Ein              | 17079 |
| Placa Fin            | 3750            | 0,05        | 1,027 | 1,031       | 1,029 | F1_Fin               | 1168  |
|                      | 3750            | 0,1         | 1,112 | 1,074       | 1,093 | F3_Fin               | 4899  |
|                      | 3750            | 0,2         | 1,160 | 1,090       | 1,125 | F5_Fin               | 6979  |
|                      | 3750            | 0,4         | 1,320 | 1,287       | 1,303 | F7_Fin               | 13998 |
|                      | 7500            | 0,05        | 1,039 | 1,037       | 1,038 | F9_Fin               | 1701  |
|                      | 7500            | 0,1         | 1,076 | 1,064       | 1,070 | F11_Fin              | 3315  |
|                      | 7500            | 0,2         | 1,097 | 1,229       | 1,163 | F13_Fin              | 4231  |
|                      | 7500            | 0,33        | 1,202 | 1,224       | 1,213 | F15_Fin              | 8819  |
|                      |                 |             |       |             |       | F2_Ein               | 1892  |
|                      |                 |             |       |             |       | F4_Ein               | 2978  |
|                      |                 |             |       |             |       | F6_Ein               | 6433  |
|                      |                 |             |       |             |       | F8_Ein               | 11452 |
|                      |                 |             |       |             |       | F10_Ein              | 1641  |
|                      |                 |             |       |             |       | F12_Ein              | 1478  |
|                      |                 |             |       |             |       | F14_Ein              | 7212  |
|                      |                 |             |       |             |       | F16_Ein              | 9072  |
|                      |                 |             |       |             |       | F2_Fin               | 1340  |
|                      |                 |             |       |             |       | F4_Fin               | 3248  |
|                      |                 |             |       |             |       | F6_Fin               | 3937  |
|                      |                 |             |       |             |       | F8_Fin               | 12530 |
|                      |                 |             |       |             |       | F10_Fin              | 1616  |
|                      |                 |             |       |             |       | F12_Fin              | 2798  |
|                      |                 |             |       |             |       | F14_Fin              | 10018 |
|                      |                 |             |       |             |       | F16_Fin              | 9785  |

Figura 7.12: Resultados numéricos para entrada, ferramenta C (convencional, 140°).

| Saída Ferramenta C |                 |             |       |             |  |                      |         |         |         |
|--------------------|-----------------|-------------|-------|-------------|--|----------------------|---------|---------|---------|
| Parâmetros         |                 | Ensaio 1    |       | Ensaio 2    |  | Quantidade de Pixels |         |         |         |
| Vrot<br>[rpm]      | Vav<br>[mm/rot] | Delaminagem |       | Delaminagem |  | Del Media            | F1_Eout | F2_Eout | F3_Eout |
| Placa<br>Eout      | 938             | 0,05        | 1,056 | 1,048       |  | 1,052                | 2449    | 2109    |         |
|                    | 938             | 0,1         | 1,063 | 1,097       |  | 1,080                | 2735    | 4238    |         |
|                    | 938             | 0,2         | 1,063 | 1,205       |  | 1,134                | 2767    | 8978    |         |
|                    | 938             | 0,4         | 1,063 | 1,060       |  | 1,062                | 2772    | 2636    |         |
|                    | 1875            | 0,05        | 1,055 | 1,141       |  | 1,098                | 2396    | 6159    |         |
|                    | 1875            | 0,1         | 1,216 | 1,332       |  | 1,274                | 9460    | 14534   |         |
|                    | 1875            | 0,2         | 1,131 | 1,148       |  | 1,139                | 5708    | 6449    |         |
|                    | 1875            | 0,4         | 1,100 | 1,122       |  | 1,111                | 4357    | 5345    |         |
| Placa<br>Fout      | 3750            | 0,05        | 1,056 | 1,087       |  | 1,071                | 2443    | 3797    |         |
|                    | 3750            | 0,1         | 1,100 | 1,079       |  | 1,090                | 4390    | 3461    |         |
|                    | 3750            | 0,2         | 1,126 | 1,132       |  | 1,129                | 5528    | 5787    |         |
|                    | 3750            | 0,4         | 1,070 | 1,104       |  | 1,087                | 3060    | 4549    |         |
|                    | 7500            | 0,05        | 1,142 | 1,177       |  | 1,160                | 6210    | 7756    |         |
|                    | 7500            | 0,1         | 1,078 | 1,117       |  | 1,097                | 3396    | 5114    |         |
|                    | 7500            | 0,2         | 1,071 | 1,087       |  | 1,079                | 3084    | 3796    |         |
|                    | 7500            | 0,33        | 1,169 | 1,268       |  | 1,218                | 7384    | 11705   |         |

Figura 7.13: Resultados numéricos para saída, ferramenta C (convencional, 140°).

## Resultado numéricos: Técnicas de furação.

| Entrada Pré-furo |              |             |             |                      |     |       |     |       |     |
|------------------|--------------|-------------|-------------|----------------------|-----|-------|-----|-------|-----|
| Parâmetros       |              | Ensaio 1    | Ensaio 2    | Quantidade de Pixels |     |       |     |       |     |
| Vrot [rpm]       | Vav [mm/rot] | Delaminagem | Delaminagem | Delaminagem Média    | F1  | F2    | F3  | F4    | F5  |
| Ferr. A          | 0,05         | 1,048       | 1,042       | 1,045                | F1  | 2078  | F3  | 3493  | F5  |
|                  | 0,1          | 1,080       | 1,137       | 1,109                | F3  | 3493  | F5  | 12524 | F7  |
|                  | 0,2          | 1,286       | 1,060       | 1,173                | F5  | 12524 | F7  | 14609 | F8  |
|                  | 0,4          | 1,334       | 1,365       | 1,350                | F7  | 14609 | F8  | 15958 | F9  |
| Ferr. B          | 0,05         | 1,007       | 1,017       | 1,012                | F9  | 291   | F11 | 738   | F13 |
|                  | 0,1          | 1,017       | 1,018       | 1,018                | F11 | 738   | F13 | 2161  | F15 |
|                  | 0,2          | 1,049       | 1,023       | 1,036                | F13 | 2161  | F15 | 6599  | F16 |
|                  | 0,4          | 1,151       | 1,082       | 1,116                | F15 | 6599  | F16 | 3579  | F17 |
| Placa Gin&Hin    |              |             |             |                      |     |       |     |       |     |

Figura 7.14: Resultados numéricos para entrada, técnica de pré-furo.

| Saída Pré-furo  |                 |             |             |             |                   |                      |     |     |     |
|-----------------|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|----------------------|-----|-----|-----|
| Parâmetros      |                 | Ensaio 1    |             | Ensaio 2    |                   | Quantidade de Pixels |     |     |     |
| Vrot<br>[rpm]   | Vav<br>[mm/rot] | Delaminagem | Delaminagem | Delaminagem | Delaminagem Média | F1                   | F3  | F5  | F7  |
| Ferr. A         | 0,05            | 1,025       | 1,052       | 1,038       | 1,082             | F1                   | F3  | F5  | F7  |
|                 | 0,1             | 1,032       | 1,012       | 1,022       | 1394              | F3                   | F5  | F7  |     |
|                 | 0,2             | 1,021       | 1,011       | 1,016       | 901               | F5                   | F7  |     |     |
|                 | 0,4             | 1,022       | 1,009       | 1,016       | 965               | F7                   |     |     |     |
| Ferr. B         | 0,05            | 1,008       | 1,023       | 1,016       | 352               | F9                   | F11 | F13 | F15 |
|                 | 0,1             | 1,015       | 1,021       | 1,018       | 667               | F11                  | F13 | F15 |     |
|                 | 0,2             | 1,019       | 1,013       | 1,016       | 811               | F13                  | F15 |     |     |
|                 | 0,4             | 1,018       | 1,023       | 1,020       | 775               | F15                  |     |     |     |
| Placa Gout&Hout |                 |             |             |             |                   |                      |     |     |     |

Figura 7.15: Resultados numéricos para saída, técnica de pré-furo.



| Entrada Placas de sacrifício |                 |             |             |                      |                      |         |      |
|------------------------------|-----------------|-------------|-------------|----------------------|----------------------|---------|------|
| Parâmetros                   |                 | Ensaio 1    | Ensaio 2    |                      |                      |         |      |
| Vrot<br>[rpm]                | Vav<br>[mm/rot] | Delaminagem | Delaminagem | Delaminagem<br>Média | Quantidade de Pixels |         |      |
| Ferr. A                      | 0,05            | 1,015       | 1,021       | 1,018                | F1_Kin               | F2_Kin  | 916  |
|                              | 0,1             | 1,017       | 1,013       | 1,015                | F3_Kin               | F4_Kin  | 570  |
|                              | 0,2             | 1,041       | 1,022       | 1,032                | F5_Kin               | F6_Kin  | 980  |
|                              | 0,4             | 1,032       | 1,039       | 1,036                | F7_Kin               | F8_Kin  | 1708 |
| Ferr. B                      | 0,05            | 1,026       | 1,024       | 1,025                | F9_Kin               | F10_Kin | 1068 |
|                              | 0,1             | 1,023       | 1,023       | 1,023                | F11_Kin              | F12_Kin | 997  |
|                              | 0,2             | 1,080       | 1,080       | 1,080                | F13_Kin              | F14_Kin | 3516 |
|                              | 0,4             | 1,231       | 1,037       | 1,134                | F15_Kin              | F16_Kin | 1603 |
| Placa Kin                    |                 |             |             |                      |                      |         |      |

Figura 7.16: Resultados numéricos para entrada, técnica de placas de sacrifício.

| Saída Placas de sacrifício |                 |             |             |                      |         |         |          |
|----------------------------|-----------------|-------------|-------------|----------------------|---------|---------|----------|
| Parâmetros                 |                 | Ensaio 1    | Ensaio 2    | Quantidade de Pixels |         |         |          |
| Vrot<br>[rpm]              | Vav<br>[mm/rot] | Delaminagem | Delaminagem | Delaminagem<br>Média | F1_Kout | F2_Kout | F3_Kout  |
| Ferr. A                    | 0,05            | 1,070       | 1,061       | 1,065                | 3060    | 2647    | F4_Kout  |
|                            | 0,1             | 1,058       | 1,053       | 1,055                | 2544    | 2309    | F6_Kout  |
|                            | 0,2             | 1,037       | 1,024       | 1,030                | 1611    | 1044    | F8_Kout  |
|                            | 0,4             | 1,024       | 1,023       | 1,023                | 1033    | 986     |          |
| Ferr. B                    | 0,05            | 1,067       | 1,067       | 1,067                | 2944    | 2944    | F10_Kout |
|                            | 0,1             | 1,067       | 1,067       | 1,067                | 2949    | 2949    | F12_Kout |
|                            | 0,2             | 1,024       | 1,024       | 1,024                | 1069    | 1069    | F14_Kout |
|                            | 0,4             | 1,018       | 1,018       | 1,018                | 793     | 793     | F16_Kout |
| Placa Kout                 |                 |             |             |                      |         |         |          |

Figura 7.17: Resultados numéricos para saída, técnica de placas de sacrifício.

| Entrada Sandwich |              |             |             |                   |                      |         |        |
|------------------|--------------|-------------|-------------|-------------------|----------------------|---------|--------|
| Parâmetros       |              | Ensaio 1    | Ensaio 2    | Delaminagem Média | Quantidade de Pixels |         |        |
| Vrot [rpm]       | Vav [mm/rot] | Delaminagem | Delaminagem | Média             | F1_Jin               | F2_Jin  | F3_Jin |
| Ferr. A          | 0,05         | 1,024       | 1,033       | 1,028             | 1040                 | 1431    | 4233   |
|                  | 0,1          | 1,079       | 1,097       | 1,088             | 3437                 | F4_Jin  | 12047  |
|                  | 0,2          | 1,268       | 1,276       | 1,272             | 11732                | F6_Jin  | 19863  |
|                  | 0,4          | 1,228       | 1,454       | 1,341             | 9986                 | F8_Jin  | 2707   |
| Ferr. B          | 0,05         | 1,041       | 1,062       | 1,051             | 1784                 | F10_Jin | 3232   |
|                  | 0,1          | 1,032       | 1,074       | 1,053             | 1407                 | F12_Jin | 4422   |
|                  | 0,2          | 1,212       | 1,101       | 1,157             | 9271                 | F14_Jin | 12291  |
|                  | 0,4          | 1,171       | 1,281       | 1,226             | 7475                 | F16_Jin |        |
| Placa Jin        |              |             |             |                   |                      |         |        |

Figura 7.18: Resultados numéricos para entrada, técnica de “sandwich”.

| Saída Sandwich |                 |             |             |                      |            |          |       |
|----------------|-----------------|-------------|-------------|----------------------|------------|----------|-------|
| Parâmetros     |                 | Ensaio 1    | Ensaio 2    | Quantidade de Pixels |            |          |       |
| Vrot<br>[rpm]  | Vav<br>[mm/rot] | Delaminagem | Delaminagem | Delaminagem<br>Média | F1_Jout    | F2_Jout  | F4748 |
| Ferr. A        | 0,05            | 1,205       | 1,109       | 1,157                | F3_Jout    | F4_Jout  | 3448  |
|                | 0,1             | 1,027       | 1,079       | 1,053                | F5_Jout    | F6_Jout  | 2352  |
|                | 0,2             | 1,043       | 1,054       | 1,048                | F7_Jout    | F8_Jout  | 1322  |
|                | 0,4             | 1,039       | 1,030       | 1,035                | F9_Jout    | F10_Jout | 4884  |
| Ferr. B        | 0,05            | 1,201       | 1,112       | 1,156                | F11_Jout   | F12_Jout | 2987  |
|                | 0,1             | 1,046       | 1,068       | 1,057                | F13_Jout   | F14_Jout | 919   |
|                | 0,2             | 1,024       | 1,021       | 1,022                | F15_Jout   | F16_Jout | 1084  |
|                | 0,4             | 1,021       | 1,025       | 1,023                | Placa Jout |          |       |

Figura 7.19: Resultados numéricos para saída, técnica de “sandwich”.

## Resultado numéricos: Estudo da temperatura.

| Entrada Temperatura sem arrefecimento |                 |             |             |                      |         |         |         |         |         |
|---------------------------------------|-----------------|-------------|-------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Parâmetros                            |                 | Ensaio 1    | Ensaio 2    | Quantidade de Pixels |         |         |         |         |         |
| Vrot<br>[rpm]                         | Vav<br>[mm/rot] | Delaminagem | Delaminagem | Delaminagem<br>Média | F1_lin  | F2_lin  | F3_lin  | F4_lin  | F5_lin  |
| Ferr. A                               | 0,05            | 1,038       | 1,042       | 1,040                | 1658    | 1829    | 2623    | 4168    | 5256    |
|                                       | 0,1             | 1,060       | 1,095       | 1,078                | 8735    | 9627    |         |         |         |
|                                       | 0,2             | 1,120       | 1,110       | 1,115                |         |         |         |         |         |
|                                       | 0,4             | 1,200       | 1,220       | 1,210                |         |         |         |         |         |
| Ferr. B                               | 0,05            | 1,013       | 1,018       | 1,015                | 547     | 783     | 843     | 642     | 2738    |
|                                       | 0,1             | 1,019       | 1,015       | 1,017                | F9_lin  | F10_lin | F11_lin | F12_lin | F13_lin |
|                                       | 0,2             | 1,064       | 1,063       | 1,064                | F13_lin | F14_lin | F15_lin | F16_lin |         |
|                                       | 0,4             | 1,171       | 1,130       | 1,150                |         |         |         |         |         |
| Placa lin                             |                 |             |             |                      |         |         |         |         |         |

Figura 7.20: Resultados numéricos para entrada, estudo de temperatura sem patamares de arrefecimento entre furos.

| Entrada Temperatura com arrefecimento |                 |             |             |                      |                                      |                                      |                               |
|---------------------------------------|-----------------|-------------|-------------|----------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|
| Parâmetros                            |                 | Ensaio 1    | Ensaio 2    | Quantidade de Pixels |                                      |                                      |                               |
| Vrot<br>[rpm]                         | Vav<br>[mm/rot] | Delaminagem | Delaminagem | Delaminagem<br>Média | F1_Min<br>F3_Min<br>F5_Min<br>F7_Min | F2_Min<br>F4_Min<br>F6_Min<br>F8_Min | 2202<br>5984<br>8769<br>16049 |
| Ferr. A                               | 0,05            | 1,032       | 1,050       | 1,041                | 1414                                 | 1414                                 | 2202                          |
|                                       | 0,1             | 1,190       | 1,137       | 1,164                | 8317                                 | 8317                                 | 5984                          |
|                                       | 0,2             | 1,223       | 1,201       | 1,212                | 9761                                 | 9761                                 | 8769                          |
|                                       | 0,4             | 1,455       | 1,367       | 1,411                | 19895                                | 19895                                | 16049                         |
| Ferr. B                               | 0,05            | 1,027       | 1,027       | 1,027                | 1179                                 | 1179                                 | 1179                          |
|                                       | 0,1             | 1,022       | 1,022       | 1,022                | 981                                  | 981                                  | 981                           |
|                                       | 0,2             | 1,138       | 1,138       | 1,138                | 6022                                 | 6022                                 | 6022                          |
|                                       | 0,4             | 1,171       | 1,171       | 1,171                | 7461                                 | 7461                                 | 7461                          |
| Placa Min                             |                 |             |             |                      |                                      |                                      |                               |

Figura 7.21: Resultados numéricos para entrada, estudo de temperatura com patamares de arrefecimento entre furos.

| 10:38:06   | 10:38:12   | 10:38:36   | 10:38:55   | 10:39:13   | 10:39:32   | 10:39:47   | 10:40:02   |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| F1<br>[°C] | F2<br>[°C] | F3<br>[°C] | F4<br>[°C] | F5<br>[°C] | F6<br>[°C] | F7<br>[°C] | F8<br>[°C] |
| 23         | 24         | 28         | 26         | 24         | 35         | 27         | 30         |
| 27         | 26         | 34         | 31         |            |            |            |            |
| 30         | 29         |            |            |            |            |            |            |
| 34         | 33         |            |            |            |            |            |            |

Figura 7.22: Temperaturas e “frames” considerados para a ferramenta A (“TiN”, 140<sup>o</sup>).

| 10:40:19   | 10:41:03    | 10:41:45    | 10:42:25    | 10:43:04    | 10:43:43    | 10:44:18    | 10:44:55    |
|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| F9<br>[°C] | F10<br>[°C] | F11<br>[°C] | F12<br>[°C] | F13<br>[°C] | F14<br>[°C] | F15<br>[°C] | F16<br>[°C] |
| 20         | 20          | 22          | 21          | 21          | 22          | 20          | 22          |
| 21         | 21          | 26          | 23          | 25          | 26          | 26          | 27          |
| 24         | 22          | 30          | 25          | 30          | 31          |             |             |
| 26         | 24          | 35          | 27          |             |             |             |             |
| 29         | 25          | 42          | 27          |             |             |             |             |
| 31         | 26          | 47          | 28          |             |             |             |             |
| 33         | 27          |             |             |             |             |             |             |
| 35         | 28          |             |             |             |             |             |             |
| 37         | 29          |             |             |             |             |             |             |
| 41         | 29          |             |             |             |             |             |             |
| 45         | 29          |             |             |             |             |             |             |
| 48         | 29          |             |             |             |             |             |             |
| 51         | 30          |             |             |             |             |             |             |

Figura 7.23: Temperaturas e “frames” considerados para a ferramenta B (“Diamond”, 120<sup>o</sup>).



| Furos   | TEMP<br>[°C] | Vav<br>[mm/rot] |         |
|---------|--------------|-----------------|---------|
| F1&F2   | 33,5         | 0,05            | Ferr. A |
| F3&F4   | 32,5         | 0,1             |         |
| F5&F6   | 29,5         | 0,2             |         |
| F7&F8   | 28,5         | 0,4             |         |
| F9&F10  | 40,5         | 0,05            | Ferr. B |
| F11&F12 | 37,5         | 0,1             |         |
| F13&F14 | 30,5         | 0,2             |         |
| F15&F16 | 26,5         | 0,4             |         |

Figura 7.24: Resultados numéricos para o estudo de temperatura Vs delaminação, para a ferramenta A (“TiN”, 140<sup>o</sup>) e B (“Diamond”, 120<sup>o</sup>).